

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy - 342

**Spolehlivost a LCC systému klimatizace ve vozidlech  
metra**

Reliability and LCC of Subway Vehicles Air Conditioning System

Student: Seroiszka Robert

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Famfulík Jan, Ph.D.

Ostrava 2018

## Zadání bakalářské práce

Student: **Robert Seroiszka**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2301R003 Dopravní technika a technologie**  
Téma: **Spolehlivost a LCC systému klimatizace ve vozidlech metra**  
**Reliability and LCC of Subway Vehicles Air Conditioning System**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je stanovení bezporuchovosti klimatizační jednotky metra a výpočet LCC.

1. Úvod
2. Metody hodnocení bezporuchovosti systémů
3. Výpočet nákladů životního cyklu (LCC)
4. Hodnocení bezporuchovosti systému klimatizace
5. Stanovení nákladů na údržbu u systému klimatizace
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

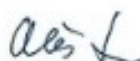
1. FAMFULÍK, J., HRANOŠ, V., KRZYŽANEK, R., GALVASOVÁ, Z. Spolehlivost pozemní dopravy [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2013 [cit. 2017-02-05]. ISBN 978-80-248-3266-1. Dostupné z: [https://issuu.com/michdor/docs/m11\\_text](https://issuu.com/michdor/docs/m11_text).
2. Famfulík, J.: Teorie údržby. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1029-8.
3. Inspiro: The metro platform from Siemens. In: SIEMENS [online]. Germany: Siemens AG 2016 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/metros/inspiration-citylife-inspiro/inspiro-plattform-en.pdf>.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Famfulík, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: .....



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Robert Seroiszka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Karviná – Staré město, Hlíny 450/6 A

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

SEROISZKA, R. *Spolehlivost a LCC systému klimatizace ve vozidlech metra*. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2018, Bakalářská práce, vedoucí: Famfulík, J.

Bakalářská práce porovnává zálohované systémy klimatizační jednotky metra od společnosti Siemens s nezálohovanými systémy klimatizační jednotky. Je proveden odhad nákladů životního cyklu z hlediska preventivní a korektivní údržby. Analýza bezporuchovosti funkčních režimů klimatizace bude provedena za pomoci FTA metody. Výstupem práce je zhodnocení a porovnání nákladů životního cyklu ve vztahu k dosažené bezporuchovosti systému klimatizace.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

SEROISZKA, R. *Reliability and LCC of Subway Vehicles Air Conditioning System*. Ostrava: Institute of Transportation, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2018, Bachelor thesis, thesis head: Famfulík, J.

The bachelor thesis compares backed up systems of air conditioning unit of Siemens company metro vehicles with the not backed up systems of air conditioning unit. There is made a estimation of life cycle cost for preventive and corrective maintenance. Reliability analysis of functional air conditioning modes will be done using FTA methods. The output of the work is the evaluation and comparison of the life cycle costs in relation to the air-condition system's reliability.

# Obsah

1	Úvod .....	9
1.1	Charakteristika dopravního systému metra .....	9
1.1.1	Historie .....	10
1.1.2	Typologie metra .....	10
1.1.3	Rozdělení z hlediska řízení .....	12
1.1.4	Technologie metra .....	12
1.2	Systémy klimatizace ve vozidlech metra .....	13
1.2.1	Klasifikace vozidel .....	13
1.2.2	Požadavky na výkon topných a chladících systémů .....	13
1.2.3	Klimatické zóny jednotlivých zemí .....	15
1.3	Základní prvky klimatizace .....	16
2	Metody hodnocení bezporuchovosti systémů .....	18
	Rozdělení pravděpodobnosti náhodných veličin .....	19
2.1	Exponenciální rozdělení .....	19
2.2	Poissonovo rozdělení .....	21
2.3	Další ukazatelé bezporuchovosti systémů .....	23
2.4	Úvod do analýzy FTA .....	25
3	Výpočet nákladů životního cyklu (LCC) .....	27
3.3	Charakteristika etap životního cyklu .....	27
3.4	Metodika výpočtů nákladů .....	28
4	Hodnocení bezporuchovosti klimatizace .....	30
4.1	Analýza bezporuchovosti klimatizační jednotky .....	30
4.1.1	Poruchový stav ztráta chlazení (FTA) .....	31
4.1.2	Poruchový stav částečná ztráta ohřevu (FTA) .....	35
4.1.3	Poruchový stav úplná ztráta ohřevu (FTA) .....	36

4.1.4	Poruchový stav částečná ztráta ventilace (FTA) .....	39
4.1.5	Poruchový stav úplné ztráty ventilace (FTA) .....	40
4.2	Tabulkový přehled pravděpodobností poruch jednotlivých stavů .....	41
4.3	Návrh opatření pro zlepšení spolehlivosti klimatizace .....	41
4.3.1	Návrh opatření pro ztrátu chlazení .....	41
4.3.2	Návrh opatření pro úplnou ztrátu ohřevu .....	45
5	Stanovení nákladů na údržbu u systému klimatizace .....	47
5.1	Výpočet nákladů preventivní údržby .....	47
5.2	Výpočet nákladů korektivní údržby .....	53
5.3	Grafické vyjádření nákladů životního cyklu .....	57
6.	Závěr .....	61
	Seznam použité literatury .....	65
	Seznam použitých obrázků .....	66
	Seznam tabulek .....	67

## **Seznam použitých zkratek**

DC	Stejnoseměrný proud
EN	Evropská norma
EUR	Euro
FTA	Analýza stromu poruchových stavů
GoA	Stupně automatizace
LCC	Náklady životního cyklu
FIT	Počet poruch za $10^9$ hodin
Tic	Teplota ve vozidle
Tem	Venkovní teplota



# 1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je výpočet nákladů životního cyklu klimatizační jednotky a analýza bezporuchovosti klimatizace a jejich funkčních režimů. Bude provedeno porovnání navrhnutých zálohovaných a nezálohovaných systémů vzhledem k dosažené spolehlivosti klimatizační jednotky a nákladů životního cyklu. Konkrétně se bude pracovat s jednotkou metra, kterou vyvíjí společnost Siemens.

V teoretické části jsou charakterizovány dopravní systémy metra a jeho vozidla. Budou zpracovány systémy klimatizace ve vozidlech metra, jejich dělení do klimatických zón a určíme požadavky na chlazení a vytápění v daných klimatických zónách. Následně blíže specifikujeme konkrétní klimatizační jednotku, její funkce a základní prvky. Dále stanovíme základní ukazatele bezporuchovosti a bude popsána analýza stromu poruchových stavů. Také bude určena metodika výpočtů nákladů životního cyklu.

V praktické části se provede analýza bezporuchovosti klimatizační jednotky. S danou spolehlivostní analýzou prvků klimatizace proběhne výpočet spolehlivosti jednotlivých funkčních režimů klimatizační jednotky s využitím FTA.

Další část je zaměřena na výpočet a vyhodnocení nákladů na údržbu klimatizační jednotky (preventivní a korektivní údržba). Budou sestaveny grafy pro porovnání jednotlivých nákladů. V závěru jsou vyhodnoceny náklady životního cyklu pro zálohované, a nezálohované systémy ve vztahu k dosažené bezporuchovosti systému klimatizace.

## 1.1 Charakteristika dopravního systému metra

Výraz vychází z francouzského Chemin de fer Metropolitain – železnice hlavního města, anglicky Metropolitian Railway, metropolitní železnice. <sup>1</sup> Metro (podzemní dráha) je kapacitní páteřní prostředek městské hromadné dopravy osob, provozovaný na oddělené dopravní cestě. <sup>1</sup> Nemusí být nezbytně pod zemí, využívá elektrického pohonu a železniční technologie. Dopravní cesta je segregována od ostatní dopravy například tím, že je vedena pod povrchem v ražených či hloubených tunelech. Přístupy k nástupištím jsou řešeny mimoúrovňově. Jedná se o prostředek, který je na kolejovém tělese v technických parametrech železničního tělesa, tudíž je technicky a provozně odvozen od železniční technologie, i když je síť metra nezávislá a nenavazuje na železniční síť. Metro je napájeno

elektrickým proudem, nejčastěji 750 V (DC). Proud se odebírá zpravidla odběrem z důvodu konstrukce a uspořádání tunelu.

#### 1.1.1 Historie

Metro bylo poprvé uvedeno do provozu v Londýně roku 1863 na krátkém úseku Paddington – Farringdon. Nejprve bylo u metra využíváno parního pohonu, později se však ukázalo, že toto řešení je nevhodné a posléze se přešlo na pohon elektrický. Další stavby metra následovaly v Istanbulu (1875), Athénách (1895), v Budapešti (1896), Paříži (1900) a Berlíně (roku 1902). V Moskvě bylo metro uvedeno do provozu až v roce 1935, v Petrohradě dokonce až roku 1955. V Praze začaly první jízdy metra roku 1974.

#### 1.1.2 Typologie metra

Metro je možné klasifikovat podle různých hledisek.

a) Podle umístění metra ve vztahu k terénu: <sup>1</sup>

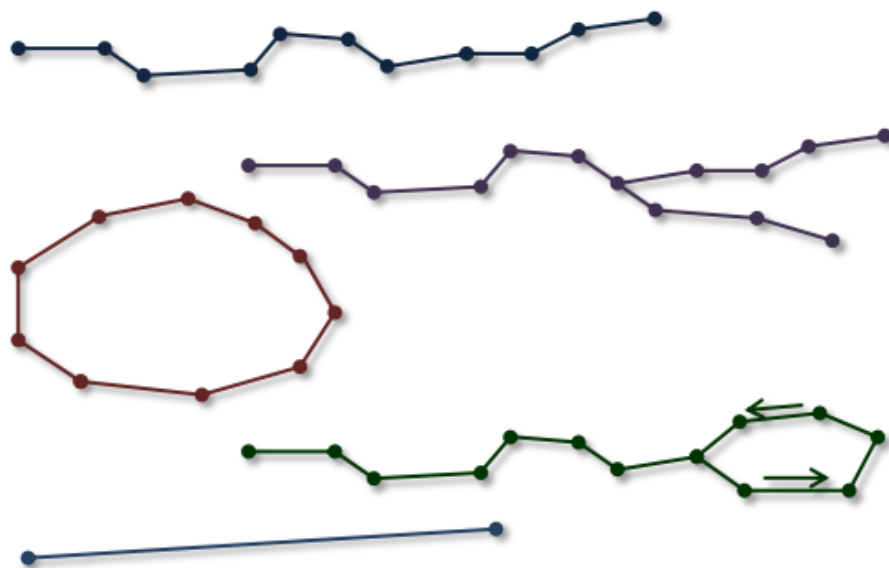
- Nadzemní – metro je situováno nad pozemní dopravní sítí, estakádě
- Povrchové – část sítě metra může být situována i na povrchu, kde je od ostatní dopravy segregováno nadjezdy a podjezdy
- Zapuštěné – trasa metra je zapuštěná, ale není seshora uzavřena do hloubky max. 5 metrů
- Hloubené – tunely jsou hloubeny ze zemského povrchu do hloubky 10 metrů.
- Ražené – tunely jsou raženy pod zemí v hloubce od 20 m do 50 m, mohou i více

b) Podle technicko – dopravní koncepce:

- Lehké metro – je metro na bázi tramvaje, vyznačuje se s kratšími a lehčími vozovými jednotkami, má menší profil tunelů a maximálně přepraví 20 000 cestujících za hodinu
- Standartní metro – toto metro pracuje na bázi železniční technologie s rozestupy stanic do 2 km, má přepravní kapacitu kolem 40 000 cestujících za hodinu
- Metro se zrychlenými úseky – některým vozovým soupravám metra je umožněno průjezd vybranými stanicemi díky čtyřkolejným profilům tunelů
- Rychlé metro / expresní – je metro s velkými rozestupy stanic (kolem 4 km) umožňující vyvinutí vyšší rychlosti a zkrácení jízdní doby

c) Podle způsobu provozu tras metra:

- Metro bez větvení tras
- Metro s větvením tras
- Okružní metro
- Metro s kruhovým ukončením trasy
- Metro s kyvadlovým provozem mezi dvěma stanicemi



Obrázek 1.1 Typologie metra podle způsobu tras <sup>1</sup>

kde:

metro bez větvení tras (tmavě modrá)

metro s větvením tras (fialová)

okružní metro (hnědá)

metro s kruhovým ukončením trasy (zelená)

metro s kyvadlovým provozem mezi dvěma stanicemi (bledě modrá)

d) Podle způsobu řízení vozového parku: <sup>1</sup>

- Metro řízené strojvedoucím
- Automaticky řízené metro

e) Podle technologické koncepce dopravní cesty: <sup>1</sup>

- Metro na kolejích
- Metro na pneumatikách, resp. na pryžových obručích

### 1.1.3 Rozdělení z hlediska řízení

Provoz jednotek metra se svým způsobem výrazně neliší od provozu vlaků na železnici, tudíž můžeme způsob řízení metra rozdělit do pěti skupin řízení vozidel na železnici (GoA), které schválila Mezinárodní asociace veřejné dopravy (UITP).<sup>4</sup>

- GoA 0 – provoz je řízený ručně, např. řízení tramvají
- GoA 1 – manuální řízení vlaku, obsluha hnacího vozu řídí otevírání a zavírání dveří, rozjezdy a zastavování a řeší náhlé situace
- GoA 2 – poloautomatické řízení, obsluha hnacího vozu ovládá pouze dveře a ujímá se řízení vlaku v případě stavu nouze
- GoA 3 – vlak je obsluhován pouze po otvírání a zavírání dveří a pro případ mimořádné události
- GoA 4 – bezobslužné vlakové řízení, vše je plně automatizováno, dokonce i zvládání nouzových situací

### 1.1.4 Technologie metra

Technologie metra se sestává z dílčích objektů a provozních souborů, zejména:<sup>1</sup>

- Dopravní cesta metra – patří zde i obratiště, manipulační spojky, veškeré technologie napájení a zajištění provozu, technologie odvětrání tunelů atd.
- Vozový park – mobilní technika
- Stanice metra – rozdělují se na podzemní a nadzemní část a na spojovací tunely, včetně veškeré související technologie (výtahy, vzduchotechnika, eskalátory, zabezpečovací technika, informační systémy atd.)
- Vozovny/depa – údržby vozových jednotek
- Měničny – rozvody elektrické energie
- Provozní dispečink – zajišťuje řízení provozu metra a řešení neočekávaných dopravních situací, signalizace, komunikace

## 1.2 Systémy klimatizace ve vozidlech metra

Příměstské i regionální vozidla a také vozidla metra i tramvaje vybavené chladícím nebo topným zařízením se řídí evropskou normou. Tato norma specifikuje komfortní parametry cestujících pro jízdu v kupé, klasickém voze nebo i jedno a více podlažních vozech. Stejně úrovně komfortu jsou touto normou aplikovány i na vozy obsluhy. Jídelní vozy mají výjimku. Podmínky parametrů definovány normou EN 14750-2.

### 1.2.1 Klasifikace vozidel

Existují smluvní podmínky, které detailně klasifikují vozidla podle počtu cestujících (sedících, stojících) a zohledňuje každé další předpoklady potřebné k výpočtu tepelné kapacity klimatizace.

Tabulka 1.1.1 Klasifikace vozidel podle EN 14750-2 <sup>3</sup>

	<b>Kategorie A</b>	<b>Kategorie B</b>
Stojící cestující	< 4 cestující/m <sup>2</sup>	≥ 4 cestující/m <sup>2</sup>
Průměrný čas cesty cestujících	> 20 min	≤ 20 min
Průměrný čas mezi dvěma zastávkami	> 3 min	≤ 3 min

Předměstské a regionální vozidla spadají do kategorie A, zatímco ostatní vozy by měly být brány jako vozidla kategorie B.

### 1.2.2 Požadavky na výkon topných a chladících systémů

#### a) Požadavky na topení

Při minimální venkovní teplotě v dané klimatické zóně (viz. Tabulka 1.1.2), při maximální možné rychlosti vozidla a bez pasažérů by neměla průměrná vnitřní teplota ve všech klimatických zónách klesnout pod 15 °C pro kategorii A, a pod 10 °C pro vozidla kategorie B.

Tabulka 1.1.2 Definice klimatických zón (zima) <sup>3</sup>

<b>Klimatické zóny (zima)</b>	<b>Minimální venkovní teploty °C</b>
I	-10
II	-20
III	-40

## b) Požadavky na chlazení

Tento požadavek nám určuje maximální dovolenou průměrnou teplotu ve vozidle. Požadavky se liší podle klimatické zóny a maximální venkovní teploty, kterou lze zde naměřit (viz. Tabulka 1.3). Platí pro průměrně obsazené, nepohybující se vozidlo. V tomto vozidle nesmí být vnitřní teplota nižší, než hodnoty uvedené v Tabulce 1.4.

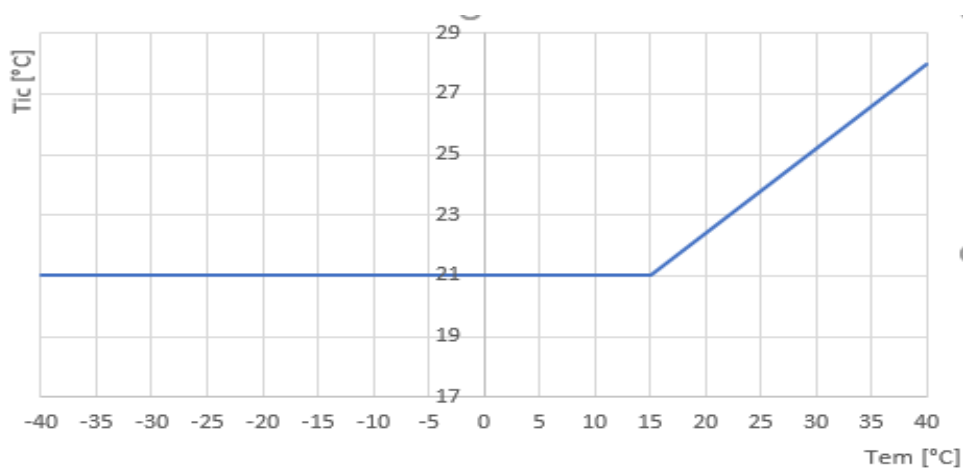
Tabulka 1.1.3 Definice klimatických zón (léto) <sup>3</sup>

Klimatická zóna (léto)	Maximální venkovní teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Ekvivalentní solární zátěž [W/m <sup>2</sup> ]
I	+40	40	800
II	+35	50	700
III	+28	45	600

Tabulka 1.1.4 Maximální průměrné teploty ve vozidle <sup>3</sup>

Klimatická zóna (léto)	Kategorie A [°C]	Kategorie B [°C]
I	+30	+32
II	+30	+33
III	+26	+29

Existuje regulační křivka, která slouží k doporučení teploty ve vozidle v závislosti na momentální venkovní teplotě.



Obrázek 1.2 Doporučené nastavení teploty interiéru <sup>3</sup>

kde:

Tic – teplota interiéru [°C]

Tem – venkovní teplota [°C]

### 1.2.3 Klimatické zóny jednotlivých zemí

Evropské země jsou normativně rozřazeny do klimatických zón (I, II, III), jejich přehled je zobrazen v Tabulce 1.5.

Tabulka 1.1.5 Evropské země a jejich klimatické zóny <sup>3</sup>

<b>Země</b>	<b>V zimě</b>	<b>V létě</b>
Rakousko	zóna II	zóna II
Belgie	zóna II	zóna II
Bulharsko	zóna II	zóna II
Česko	zóna II	zóna II
Chorvatsko	zóna II	zóna II
Dánsko	zóna II	zóna II
Francie	zóna II	zóna II
Finsko	zóna III	zóna III
Řecko	zóna I	zóna I
Německo	zóna II	zóna II
Maďarsko	zóna II	zóna II
Irsko	zóna I	zóna III
Itálie	zóna II	zóna I
Lucembursko	zóna II	zóna II
Nizozemí	zóna II	zóna II
Norsko	zóna III	zóna III
Polsko	zóna III	zóna II
Portugalsko	zóna I	zóna I
Rumunsko	zóna II	zóna II
Srbsko	zóna II	zóna II
Slovensko	zóna II	zóna II
Slovinsko	zóna II	zóna II
Španělsko	zóna I	zóna I
Švédsko	zóna III	zóna III
Švýcarsko	zóna II	zóna II
UK	zóna I	zóna III

### 1.3 Základní prvky klimatizace

Jednotka HVAC (heating, ventilation and air conditioning), volně přeloženo jako topení, větrání a klimatizace, se dělí na tři základní části. První částí je chladicí jednotka, která dává klimatizaci chladicí schopnost, se skládá z těchto základních komponentů:

- kompresor – čerpadlo, které provádí kompresi chladiva z nízkého tlaku (nízké teploty) na vysoký tlak (vysoká teplota) a zároveň pohání chladivo
- kondenzátor – přijímá plyn z kompresoru o vysokém tlaku a teplotě, který se na kovovém povrchu kondenzátoru ochladí a změní na kapalinu
- výparník – zařízení, ve kterém se odpařuje chladivo a vytváří tak ochlazený vzduch
- expanzní ventil – reguluje množství chladicí kapaliny do výparníku

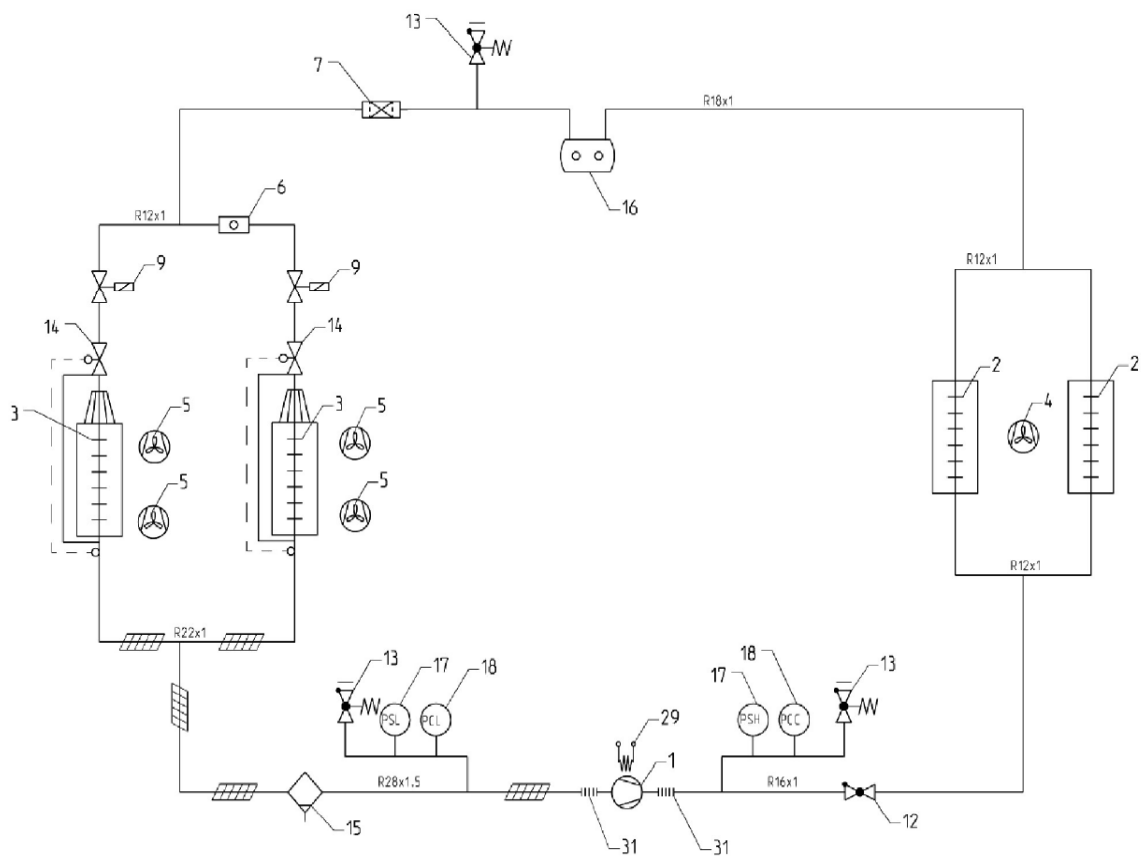
Další pomocné komponenty chladicí jednotky a schéma jejího zapojení je možné vidět na Obrázku 1.3.

Jednotka úpravy vzduchu, která je další základní částí klimatizace, má za úkol upravovat a regulovat množství ventilovaného vzduchu. Upravuje poměr mezi klimatizovaným a venkovním vzduchem pomocí zabudovaných teplotních sensorů a spínačů. Mezi hlavní komponenty jednotky pro úpravu vzduchu patří např. topná tělesa, která se s topnými tyčemi podílejí na ohřevu vzduchu. Součástí jsou i vzduchové filtry, které odstraňují nečistoty a pevné částice ze vzduchu, který jimi prochází.

Třetí základní částí jednotky klimatizace je elektronická jednotka, pomocí které můžeme klimatizaci řídit a ovládat. Obsahuje prvky, které nám klimatizaci udržují pod elektrickým napětím. Hlavní komponentou je elektronická řídicí jednotka. Najdeme zde pomocné spínače, jističe, ale také bezpečnostní složky jako je vysokonapěťová tavná pojistka.

Mezi prvky klimatizace řadíme i teplotní sensory umístěné přímo ve vozidlech nebo tlumiče vibrací klimatizační jednotky.





Obrázek 1.3 Schéma zapojení chladicí jednotky<sup>9</sup>

kde:

- |      |                                    |
|------|------------------------------------|
| 1    | Kompresor                          |
| 2    | Kondenzátor                        |
| 3    | Výparník                           |
| 4    | Ventilátor kondenzátoru            |
| 5    | Ventilátor dodávaného vzduchu      |
| 6    | Inspekční sklíčko                  |
| 7    | Vysoušeč filtru                    |
| 9    | Elektromagnetický ventil výparníku |
| 12   | Zpětný ventil                      |
| 13   | Servisní ventil                    |
| 14   | Termostatický expanzní ventil      |
| 15   | Oddělovač chladiva                 |
| 16   | Kolektor chladiva                  |
| 17 A | Vysokotlaký spínač                 |
| 17 B | Nízkotlaký spínač                  |
| 18 A | Vysokotlaký sensor                 |
| 18 B | Nízkotlaký sensor                  |
| 29   | Ohřívač klikové skříně             |
| 31   | Pružná hadice                      |

## 2 Metody hodnocení bezporuchovosti systémů

Spolehlivost je definována jako souhrnný termín, používaný pro popis pohotovosti a faktorů, které ji ovlivňují. Spolehlivost chápeme jako celkovou vlastnost tělesa, např. vozidla. V širším pojetí má spolehlivost dle ČSN EN ISO 9000:2006 jednotlivé vlastnosti: <sup>2</sup>

- Udržovatelnost – schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci tehdy, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy i prostředky
- Bezporuchovost – je schopnost objektu vykonávat požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém intervalu
- Zajištěnost údržby – je schopnost poskytovat údržbářské služby dle požadavků v daných podmínkách pomocí potřebných prostředků, které jsou v souladu s koncepcí údržby

Spolehlivost v užším pojetí (viz. Obrázek 2.1) dle ČSN IEC 50 (191) je vyjádřena jako pravděpodobnost bezporuchového provozu. <sup>2</sup> Objekt je tedy provozu schopný v daných podmínkách a v daném časovém intervalu. V této normě jsou definovány další pojmy vztahující se k bezporuchovosti a údržbě:

Základní terminologie:

- Porucha – znamená částečnou nebo úplnou ztrátu schopnosti provozu soustavy nebo prvku, dále podle stanovených podmínek provozu rozhodujeme, zda jde o poruchu nebo ne, pokud dojde ke změně schopnosti provozu
- Doba mezi poruchami – doba trvání mezi dvěma po sobě následujícími poruchami opravovaného objektu <sup>2</sup>
- Doba do první poruchy – je celková doba provozu objektu od okamžiku prvního uvedení do použitelného stavu až do poruchy <sup>2</sup>
- Údržba – je souhrn technologických postupů a činností, jejímž uplatňováním za konkrétních podmínek se provádí obnova stavu objektu
- Doba údržby – časový interval, který zahrnuje dobu údržbářského zásahu včetně technických a logistických zpoždění
- Preventivní údržba – je údržba prováděná v daných intervalech nebo podle předepsaných kritérií a jejím cílem je snížení pravděpodobnosti poruchy

- Údržba po poruše – údržba prováděná po zjištění poruchového stavu a jejím cílem je obnovení objektu do provozu schopného stavu
- Oprava – je část údržby po poruše, při níž se na objektu provádějí ruční operace <sup>2</sup>



Obrázek 2.1 Užší pojetí spolehlivosti <sup>2</sup>

## Rozdělení pravděpodobnosti náhodných veličin

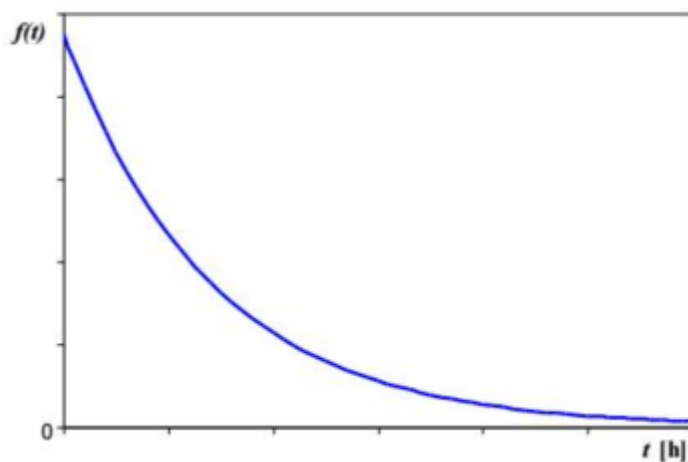
Ve spolehlivosti je vznik poruch posuzován obvykle za čas, který je objekt v provozu nebo za ujetou dráhu objektu. Doba do poruchy představuje spojitou náhodnou veličinu, jelikož může nabývat libovolné hodnoty z intervalu  $(0; \infty)$ . Rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny popisuje distribuční funkce, resp. hustota pravděpodobnosti. <sup>2</sup>

### 2.1 Exponenciální rozdělení

Ve spolehlivosti se toto rozdělení používá hlavně pro systémy, u kterých neumíme říct kdy dojde k poruše. Poruchy se vyskytují náhodně a bez opotřebení (elektronika). Exponenciální rozdělení používáme pro popis doby do vzniku náhodného jevu v Poissonově procesu. <sup>2</sup>

Výchozím parametrem exponenciálního rozdělení je  $\lambda$  – intenzita poruch. U tohoto rozdělení nezávisí na tom, zda bylo zařízení v bezporuchovém stavu již v předchozí době, tj. není závislé na stáří tohoto zařízení, a proto je exponenciální rozdělení označováno jako rozdělení bez paměti.

Hustota pravděpodobnosti  $f(t)$  má podobný průběh jako klesající exponenciální funkce (viz Obrázek 2.2).



Obrázek 2.2 Průběh hustoty pravděpodobnosti exp. rozdělení <sup>2</sup>

Pro výpočet hustoty pravděpodobnosti  $f(t)$  použijeme vztah:

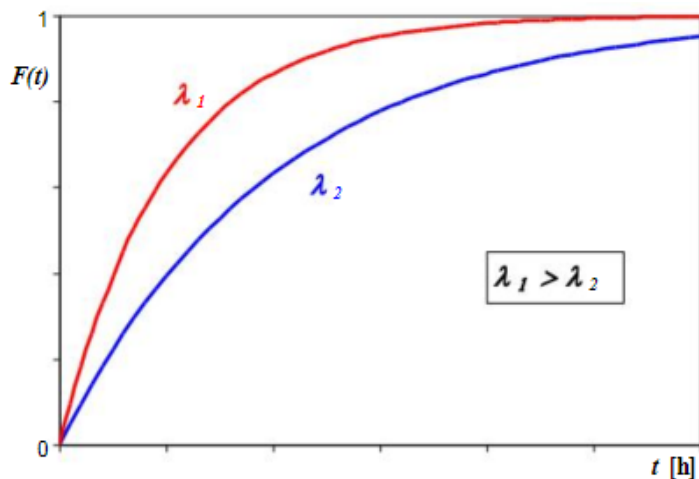
$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.1)$$

kde:

$t$  – hodnota náhodné veličiny  $T$  [h]

$\lambda$  – intenzita poruch [ $\text{h}^{-1}$ ]

Průběh Distribuční funkce  $F(t)$  pro různé hodnoty parametru  $\lambda$  můžeme vidět na Obrázek 2.3.



Obrázek 2.3 Průběh distribuční funkce odlišných intenzit poruch <sup>2</sup>

Distribuční funkce  $F(t)$  je dána vztahem:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.2)$$

Pravděpodobnost bezporuchového stavu (bezporuchovost)  $R(t)$  tedy vypočteme ze vztahu:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.3)$$

Intenzita poruch exponenciálního rozdělení je konstantní a je rovna právě hodnotě parametru rozdělení  $\lambda$ , tedy: <sup>2</sup>

$$\lambda(t) = \lambda = konst \quad (2.4)$$

## 2.2 Poissonovo rozdělení

Poissonovo rozdělení používáme pro popis pravděpodobnosti výskytu náhodných jevů za daného časového intervalu. Toto rozdělení můžeme použít za předpokladů že: <sup>2</sup>

- události se vyskytují nezávisle na sobě
- pravděpodobnost že vzniknou současně dvě události je nulová
- intenzita výskytu náhodného jevu je konstantní během celého intervalu

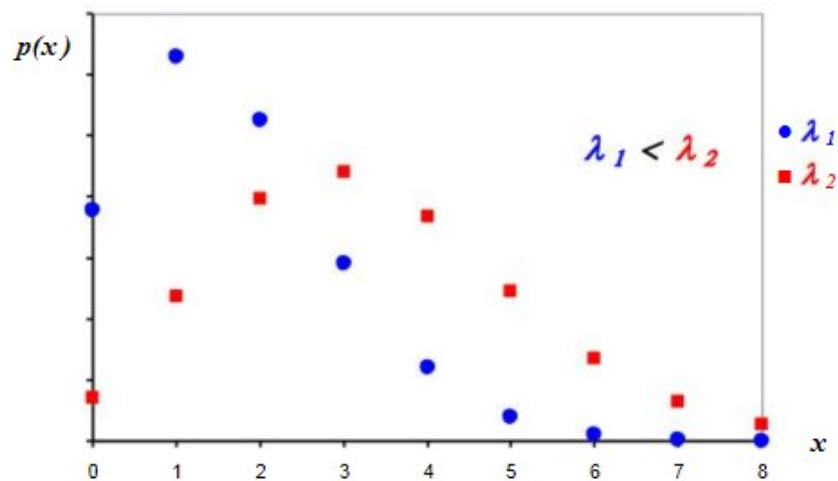
Pravděpodobnostní funkce  $p(k)$  (viz. Obrázek 2.4) vyjadřuje pravděpodobnost, že za daného časového intervalu se sledovaný jev vyskytne právě  $k$ -krát.

$$p(k) = P(X = k) = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.5)$$

kde:

$\lambda$  – intenzita náhodného jevu [ $\text{h}^{-1}$ ],  $\lambda = konst$

$k$  – počet výskytů sledovaného jevu

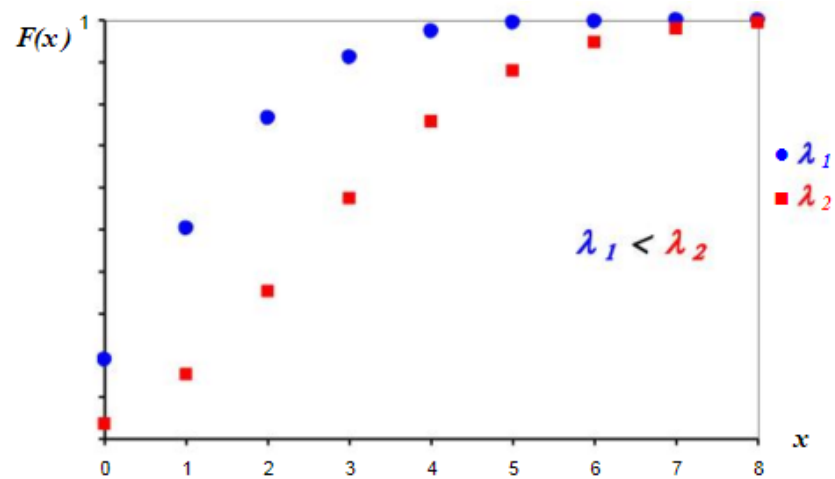


Obrázek 2.4 Pravděpodobnostní funkce pro odlišné hodnoty  $\lambda$  <sup>2</sup>

Distribuční funkce Poissonova rozdělení  $F(k)$  je dána tímto vztahem:

$$F(k) = P(X \leq a) = \sum_{k=0}^a \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2.6)$$

Průběh distribuční funkce Poissonova rozdělení pro odlišné hodnoty intenzity poruch můžeme vidět na Obrázek 2.5.



Obrázek 2.5 Distribuční funkce pro různé hodnoty  $\lambda$  <sup>2</sup>

V praktických aplikacích, které využívají Poissonovo rozdělení ve spolehlivosti se určuje pravděpodobnost, že se u zařízení v určitém časovém intervalu vyskytne nejméně jedna porucha. V tomto případě se využívá tzv. opačného jevu, tedy:

$$P(X \geq 1) = 1 - P(X = 0) \quad (2.7)$$

### 2.3 Další ukazatelé bezporuchovosti systémů

#### Střední doba mezi poruchami MTBF

Statistická veličina, zkratkou označována jako **MTBF** (Mean Time Between Failures), slouží k ohodnocení spolehlivosti výrobku. Určuje se pro obnovitelný výrobek nebo zařízení. U zařízení, které se neobnovují se určuje střední doba do poruchy **MTTF** (Mean Time to Failure). Oba pojmy měří spolehlivost, již lze statisticky definovat jako počet hodin, po které bude výrobek nebo zařízení fungovat, než se porouchá. Pro výpočet MTBF ještě zavedeme pojem střední doba pro opravu **MTTR**, která vyjadřuje průměrný čas potřebný k obnově zařízení.

Výpočet MTBF provedeme součtem střední doby do poruchy a střední doby pro opravu, tedy:

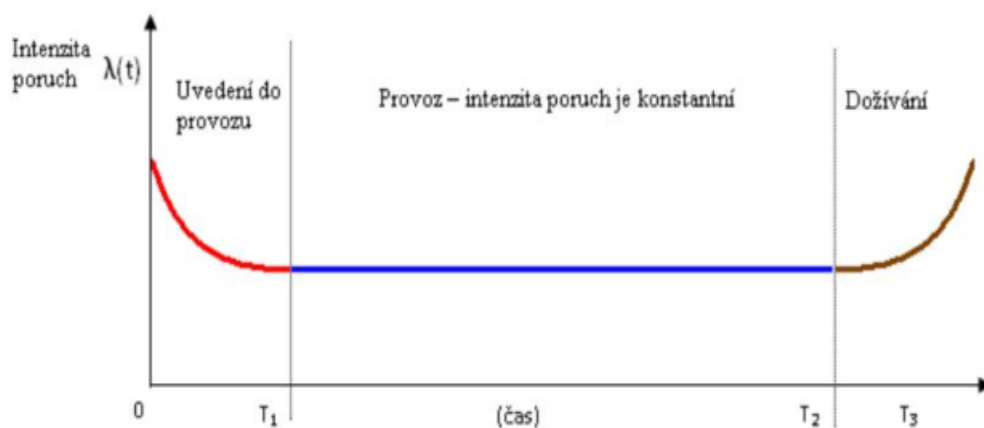
$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2.8)$$

Čím větší je tato časová hodnota, tím je zařízení spolehlivější.

#### Intenzita poruch $\lambda$

Slouží k posuzování kvality a spolehlivosti výrobků. Je definována jako přírůstek porouchaných výrobků v malém časovém intervalu  $dt$  následujícím po čase  $t$  k počtu zatím neporouchaných výrobků do času  $t$ . Intenzita poruch vyjadřuje počet poruch za jednotku času. <sup>2</sup>

Intenzita poruch se mění v závislosti využívání výrobku, např. dobou provozu nebo kilometrickým proběhem. Nejtypičtějším vyjádřením průběhu intenzity poruch je **vanová křivka**.



Obrázek 2.6 Vanová křivka <sup>2</sup>

- **interval  $<0; T_1>$**  je období se zvýšenou intenzitou poruch. V tomto období záběhu, označováno také jako období „dětských nemocí“, intenzita poruch postupně klesá a spolehlivost vozidla se zlepšuje. V této fázi provozního zatížení se projevují chyby v konstrukci a při výrobě.
- **interval  $<T_1; T_2>$**  je období normálního provozu. Intenzita poruch se ustálí na přibližně konstantní hodnotě. <sup>2</sup> Tato fáze využívá inherentní spolehlivosti vozidla a poruchy vznikají působením náhodných událostí. Tahle fáze vanové křivky je nejdelší a nabízí možnost značných úspor zvolením vhodného systému údržby.
- **interval  $<T_2; T_3>$**  je čas dožívání a likvidace. V tomto období intenzita poruch stoupá, jelikož se začíná projevovat opotřebení a další únavové jevy. Poruchy vznikají častěji a v jistém okamžiku, kdy už je provoz neúnosný nastává likvidace vozidla.

Intenzita poruch může být také vyjádřena ukazatelem **FIT** (Failures in time = selhání v čase). Tento ukazatel nám určuje, kolik nastane poruch objektu za miliardu hodin ( $10^9$  hod). Tuto hodnotu většinou udává výrobce zařízení, kterou získá ze spolehlivostní analýzy (testování objektu).

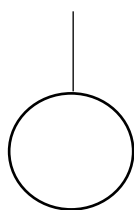


## 2.4 Úvod do analýzy FTA

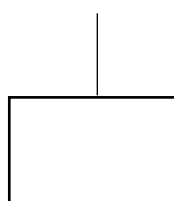
Analýza stromu poruchových stavů FTA (Fault Tree Analysis) je metoda speciálních orientovaných grafů. Tento strom poruch vyobrazuje logický diagram, u něhož znázorňujeme logické vztahy mezi potenciální vrcholovou událostí a mezi příčinami vzniku tohoto jevu.<sup>2</sup>

Strom FTA se rozvíjí deduktivní metodou od vrcholové události, která představuje poruchu systému, k dalším jevům nižší úrovně (meziudálosti), přičemž se posuzují příčiny vzniku poruchového jevu. Od meziudálostí se strom dále rozvíjí až k primárním událostem, což jsou poruchy prvků, které již nejde dále rozvíjet. Můžeme určit jejich pravděpodobnost výskytu nebo je tato pravděpodobnost daná. Víme o nich, že jsou vzájemně nezávislé.

**primární událost**



**meziudálost**



Obrázek 2.7 Značení událostí ve FTA<sup>2</sup>

Rozvoj stromů poruch se provádí pomocí logických operací. Graficky je můžeme znázornit pomocí symbolů, tzv. hradel. Každý typ hradla má jiné značení a odpovídající logické operace.

- **konjunkce** (hradlo **AND**) představuje logický součin, tedy že výstupní událost nastane, nastanou-li všechny vstupní události.

$$T = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.9)$$

kde:

T – výstupní událost

$A_i$  – vstupní události

- **disjunkce** (hradlo **OR**) je logický součet, tzn. výstupní událost nastane, dojde-li alespoň k jedné ze vstupních událostí. <sup>2</sup>

$$T = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10)$$

- **logika „m z n“** (výběrové hradlo) představuje výběrovou logiku. Výstupní událost nastane, nastane-li současně v libovolné kombinaci alespoň **m** vstupních událostí z **n** celkových, např. pro hradlo 2 ze 3:

$$T = A_1 \cdot A_2 + A_1 \cdot A_3 + A_2 \cdot A_3 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$



Obrázek 2.8 Značení hradel ve stromě poruch <sup>2</sup>

### 3 Výpočet nákladů životního cyklu (LCC)

Vzhledem ke stále rostoucím požadavkům na kvalitu a bezpečnost v oblasti dopravy je žádoucí vnímat ekonomický dopad na provozování a vlastnictví vozidla po jeho dobu provozu. LCC (Life cycle costing) je tedy ekonomická analýza k určení celkové ceny z pořízení, provozování i samotné likvidace vozidla. Výpočet nákladů životního cyklu může být proveden na celý životní cyklus produktu nebo na vybrané etapy životního cyklu vozidla. Hlavním cílem těchto analýz je poskytnout vstupní data, které nám umožní porovnat a následně vybrat vozidlo, které nejvíce vyhovuje našim požadavkům z ekonomického hlediska.

#### 3.3 Charakteristika etap životního cyklu

Základem konceptu nákladů životního cyklu je pochopení životního cyklu produktu a činností, které probíhají v šesti základních etapách. Kombinace těchto činností nám určuje spolehlivost produktu, jeho výkon, bezpečnost, udržovatelnost a další charakteristiky, které se podílejí na optimalizace nákladů životního cyklu.

Základní etapy životního cyklu:

##### 1) Etapa konceptu a stanovení požadavků

- formulují se základní požadavky na vozidlo pro oblast spolehlivosti a udržovatelnosti
- tyto požadavky stanoví výrobce nebo odběratel
- tato etapa a její rozhodnutí mají největší vliv na výrobek a celkové náklady

##### 2) Design a vývoj vozidla

- v této etapě probíhá analýza predikce spolehlivosti vycházející z použitých konstrukčních řešení
- definují se podmínky zaručující dosažení očekávané spolehlivosti

##### 3) Etapa výroby

- důležité je dodržet parametry kvality v souladu s technickou dokumentací
- probíhá zkoušení a ověřování jednotlivých dílů i kompletních vozidel

##### 4) Uvedení do provozu

- provádění přejímacích a předávacích zkoušek
- odstraňování závad, které mají původ ve výrobě

- prokazování spolehlivosti a udržitelnosti

#### 5) Etapa provozu

- dodržování optimálních intervalů pro provádění preventivní údržby, které vycházejí ze stanovených požadavků na spolehlivost
- s využitím informačních systémů a analýzy dat přezkoumávat návrh údržby

#### 6) Likvidace

- vyřazení vozidla z provozu a jeho fyzická likvidace
- možnost provedení zkoušek a stanovit zbytkovou životnost dílů, které se po opravě dají použít jako náhradní díl

### 3.4 Metodika výpočtů nákladů

V této práci stanovím celkové náklady na údržbu systému klimatizace vozidel metra. Tyto celkové náklady zahrnují náklady na preventivní i korektivní údržbu.

Mezi náklady na preventivní údržbu jsou započítány náklady na práci a náklady na materiál či díly potřebné k výměně.

$$N_{PU} = P_{PU} + M_{PU} \quad (3.1)$$

kde:

$N_{PU}$  – náklady preventivní údržby v požadovaném období [EUR]

$P_{PU}$  – náklady na práci preventivní údržby v požadovaném období [EUR]

$M_{PU}$  – náklady na materiál preventivní údržby v požadovaném období [EUR]

Náklady na korektivní údržbu se skládají z nákladů na práci a nákladů na materiál.

$$N_{KU} = P_{KU} + M_{KU} \quad (3.2)$$

kde:

$N_{KU}$  – náklady korektivní údržby v požadovaném období [EUR]

$P_{KU}$  – náklady na práci korektivní údržby v požadovaném období [EUR]

$M_{KU}$  – náklady na materiál korektivní údržby v požadovaném období [EUR]

Celkové náklady na údržbu objektu po dobu jeho předpokládané životnosti dostaneme součtem nákladů preventivní a korektivní údržby.

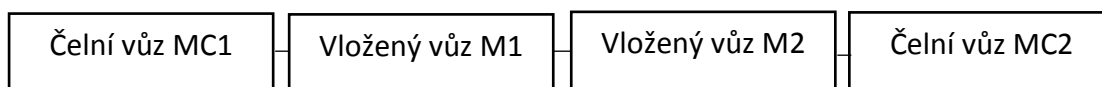
$$N_{CU} = N_{KU} + N_{PU} \quad (3.3)$$

kde:

$N_{CU}$  – celkové náklady životního cyklu na údržbu klimatizační jednotky metra [EUR]

## 4 Hodnocení bezporuchovosti klimatizace

V této práci mám za cíl analyzovat bezporuchovost klimatizační jednotky vozidel metra od společnosti Siemens. Vozová jednotka metra se skládá celkem ze dvou čelních a dvou vložených vozů. Každý z těchto vozů je vybaven právě jednou klimatizační jednotkou. Uspořádání těchto vozů je zobrazeno následujícím blokovým schématem.



Obrázek 4.1 Blokové schéma uspořádání vozů *Autor*

Další parametry potřebné k analýze bezporuchovosti jsou dány zadavatelem. Počítám, že předpokládána živostnost jednotky metra je 40 let, kdy ročně ujede vzdálenost 120 000 km. Metro bude v provozu 6000 hodin ročně a dále při výpočtu nákladů životního cyklu použiji hodinovou mzdu zaměstnanců údržby 60 EUR za hodinu. Následná tabulka s těmito daty bude sloužit jako základní vstupní údaj pro můj výpočet.

Tabulka 4.1 Parametry provozu <sup>6</sup>

Parametry		
Živostnost jednotky metra	40	let
Ujetá roční vzdálenost	120 000	Km
Roční doba provozu	6 000	hodin
Předpokládaná denní doba provozu	18	hodin
Hodinová mzda dělníků	60	EUR

### 4.1 Analýza bezporuchovosti klimatizační jednotky

V této práci je cílem vypočítat parametry bezporuchovosti pro jednotlivé funkční režimy a jejich poruchové stavy. Zabýval jsem se tedy stavy jako je ztráta chlazení v jednom voze, částečná a úplná ztráta ohřevu v jednom voze a částečná i úplná ztráta chlazení v jednom voze.

Analýzy bezporuchovosti byly provedeny pomocí FTA (stromů poruchových stavů), které byly sestaveny pomocí interního software programu společnosti Siemens.

#### 4.1.1 Poruchový stav ztráta chlazení (FTA)

Dána klimatizační jednotka je vybavena jedním chladicím okruhem. Každá z komponent je zde obsažena pouze jednou, až na kondenzátory a výparníky, které jsou dva, kvůli řešení konstrukce klimatizace. Porucha jedné komponenty chladicího okruhu tedy vede ke ztrátě chlazení v jednom vozidle metra. Pro sestrojení FTA použijí intenzity poruch FIT jednotlivých komponent ze spolehlivostní analýzy, jejichž přehled je v tabulce (viz. tabulka 4.2).

Tabulka 4.2 Spolehlivostní analýza prvků chladicího okruhu <sup>6</sup>

Komponenta	Množství	Pracovní využití [%]	Ztráta funkce [%]	Bez okamžitého efektu [%]	Intenzita poruch [FIT]
<b>Prvky chladicího okruhu</b>					
Kompresor	1	40	75	25	3188
Jistič kompresoru	1	40	100	0	200
Pomocný spínač kompresoru	1	40	100	0	100
Stykač kompresoru	1	40	100	0	300
Kondenzátor	2	40	75	25	60
Jistič ventilátoru kondenzátoru	1	40	100	0	200
Pomocný spínač ventilátoru kondenzátoru	1	40	100	0	100
Stykač ventilátoru kondenzátoru	1	40	100	0	300
Ventilátor kondenzátoru	1	40	80	20	1440
Výparník	2	40	75	25	60
Expanzní ventil	2	40	75	25	525
Vysoušeč filtru	1	40	75	25	390
Elektromagnetický ventil	2	40	75	25	562
Elektromagnetická cívka	2	40	75	25	188
Inspekční skříčko	1	40	75	25	277
Oddělovač chladiva	1	40	75	25	75
Kolektor chladiva	1	40	75	25	68
Zpětný ventil	1	40	75	25	50
Vysokotlaký spínač	1	40	75	25	390
Vysokotlaký snímač	1	40	75	25	375
Nízkotlaký spínač	1	40	75	25	390
Nízkotlaký snímač	1	40	75	25	375
Pružná trubice VT	1	40	75	25	263
Pružná trubice NT	1	40	75	25	263
Porucha ovládacího členu klapek (chlazení-ohřev)	2	100	50	50	500
Teplotní sensor	4	100	75	25	525
<b>Řízení a napájení</b>					
Řídící jednotka	1	100	90	10	4320
Měnič napětí	1	40	80	20	5280
Ventilátor měniče napětí	2	40	50	50	750

Jak bylo zmíněno výše, systém chladicího okruhu není zálohován, porucha jednoho prvku tedy vede ke ztrátě funkce chlazení. Různé netěsnosti a úniky chladicí kapaliny mají za následek automatické vypnutí klimatizace. K dispozici zůstává alespoň nouzová ventilace a proudění vzduchu ze sousedního vozu. Tato porucha vede k nežádoucímu odstavení jednotky metra v konečné stanici.

U výpočtů bezporuchovosti funkčního stavu chlazení předpokládáme, že režim chlazení je využíván jen 40 % celkového času životnosti metra. Z tohoto důvodu násobíme celkovou intenzitu poruch chladicí jednotky číslem 0,4 (viz. tabulka 4.2). Ve stromě poruchových stavů pro tento případ převážně využíváme hradla typu OR a „m z n“, jen u vrcholové události je použito hradlo AND (viz. obrázek 4.2). V FTA byl kvůli lepší orientaci vytvořen podstrom, ve kterém se nachází zbylé prvky chladicího okruhu (viz. obrázek 4.3).

Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav ztráty chlazení v jednom voze je 33 811 FIT, aneb 33 811 poruch za miliardu hodin. Pro lepší představu bylo toto číslo převedeno na počet poruch za životní cyklus jednotky metra.

$$X = \frac{R \cdot \check{Z} \cdot \lambda_{IP}}{10^9} \quad (4.1)$$

kde:

$X$  – předpokládaný počet poruch chladicí jednotky během životnosti metra

$R$  – doba ročního provozu metra [hod]

$\check{Z}$  – požadovaná životnost jednotky metra [let]

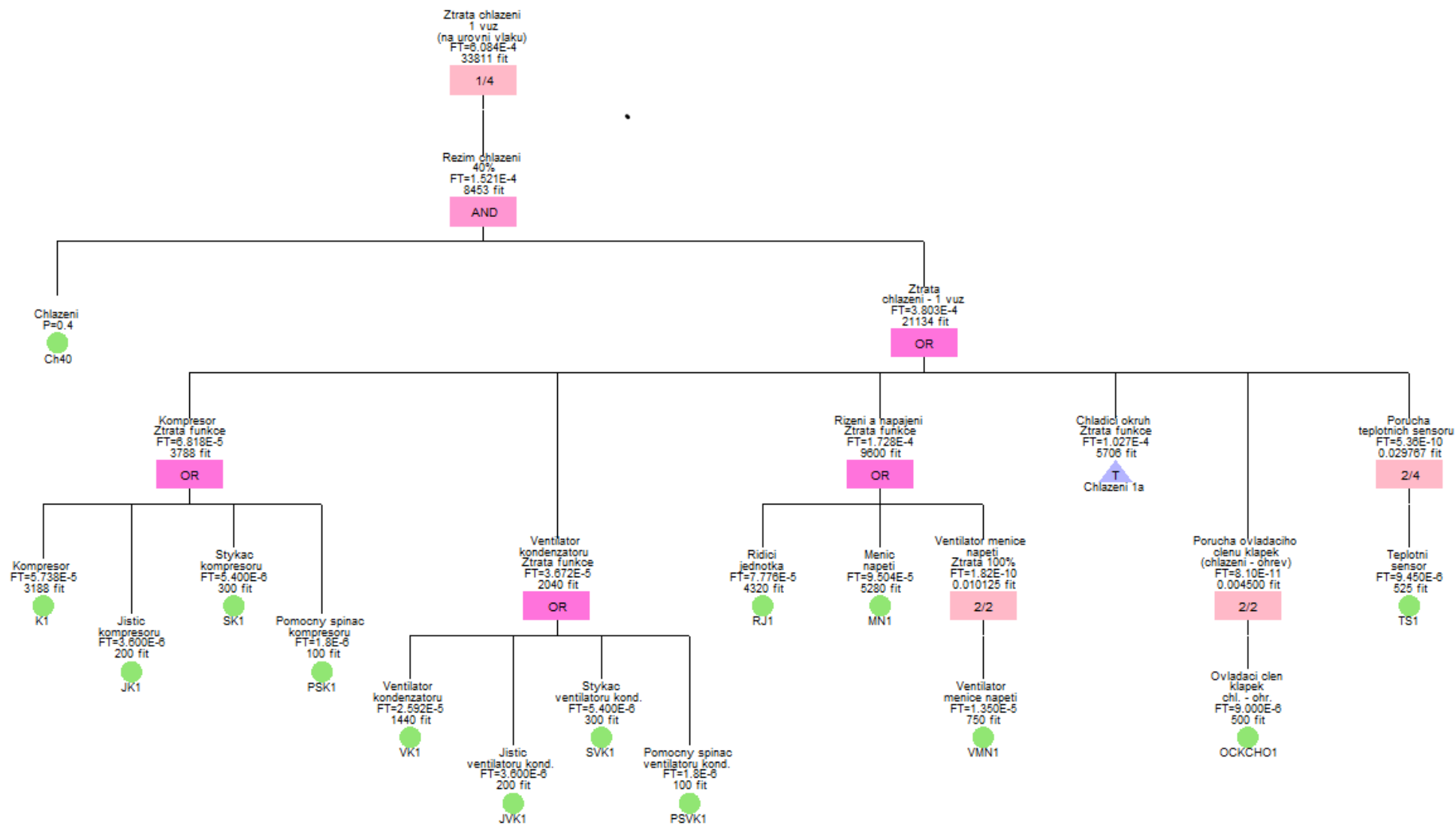
$\lambda_{IP}$  – intenzita poruch [FIT]

po dosazení:

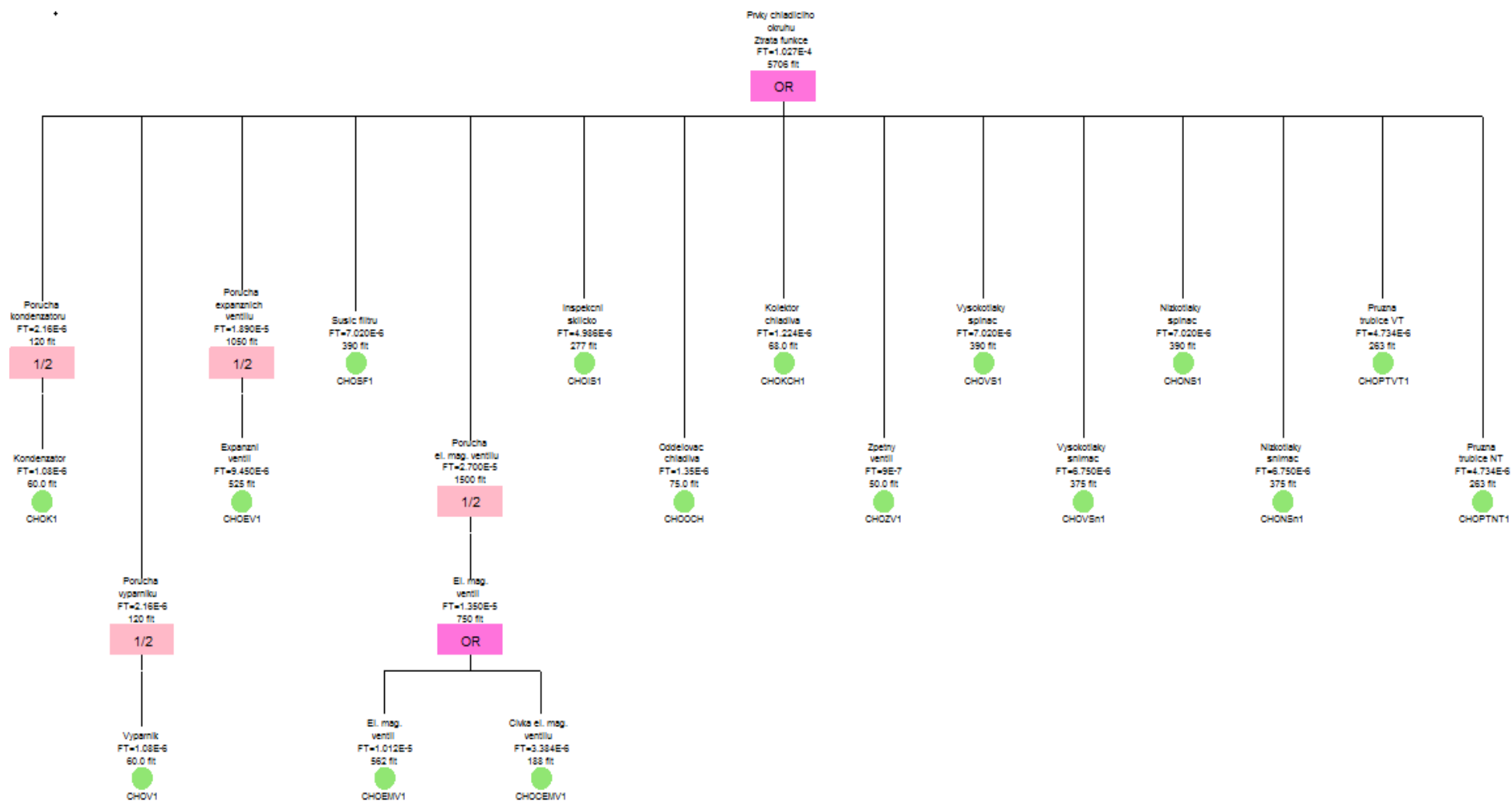
$$X = \frac{6000 \cdot 40 \cdot 33811}{10^9} = 8,11 \cong 8$$

Po přepočtu lze říci, že nastane přibližně 8krát poruchový stav ztráty chlazení v jednom vozidle metra po dobu jeho životnosti.





Obrázek 4.2 FTA pro poruchový stav ztráty chlazení <sup>Autor</sup>



Obrázek 4.3 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty chlazení Autor

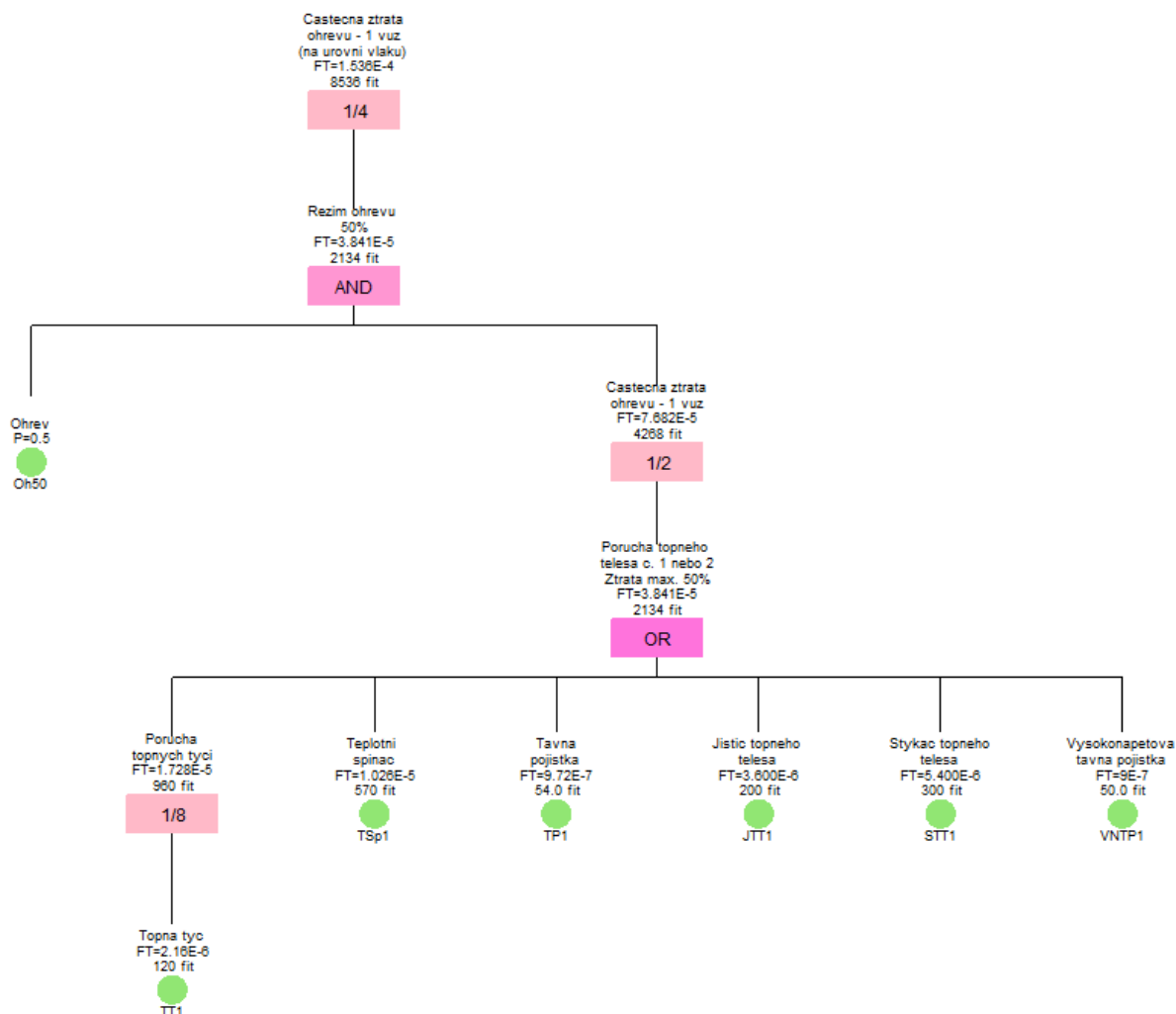
#### 4.1.2 Poruchový stav částečná ztráta ohřevu (FTA)

Částečnou ztrátou je myšleno, že ohřev je stále funkční alespoň z 50 % celkového výkonu. Tento poruchový stav není považován za stav narušující provoz metra. Jestliže je tato porucha detekována, odstranění závady proběhne na konci dne, jinak až při další preventivní prohlídce. Při tvorbě FTA opět vycházíme ze spolehlivostní analýzy jednotlivých komponent. Podobně jako u chlazení i zde počítáme jen s 50 % pracovního využití komponent topného tělesa (viz. tabulka 4.3). Částečná ztráta ohřevu topného tělesa nastane, jestliže dojde k poruše alespoň jedné komponenty, která se podílí na funkci ohřevu.

Tabulka 4.3 Spolehlivostní analýza pro částečnou ztrátu ohřevu <sup>6</sup>

Komponenta	Množství	Pracovní využití [%]	Intenzita poruch [FIT]
Topná tyč	8	50	120
Teplotní spínač	2	50	570
Tavná pojistka	2	50	54
Jistič topného tělesa	2	50	200
Stykač topného tělesa	2	50	300
Vysokonapěťová tavná pojistka	2	50	50

Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav částečné ztráty ohřevu je 8536 FIT (viz. obrázek 4.4). Tedy v přepočtu (viz. vzorec 4.1) tento stav během životnosti metra nastane asi 2krát.



Obrázek 4.4 FTA částečné ztráty ohřevu Autor

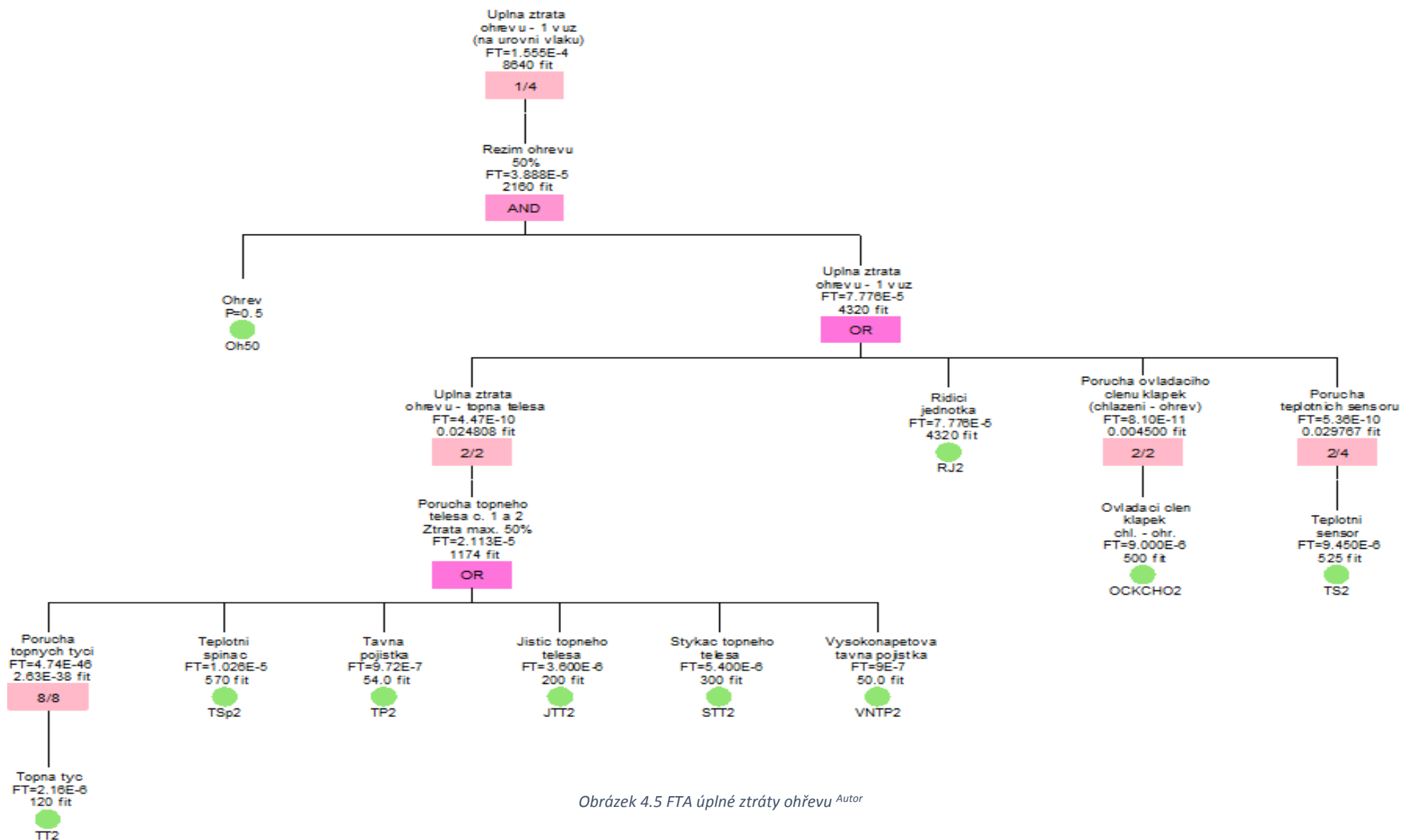
#### 4.1.3 Poruchový stav úplná ztráta ohřevu (FTA)

Úplná ztráta ohřevu nastane v případě selhání nadměrného množství komponent (např. obou teplotních spínačů nebo při poruše všech topných tyčí). Tento poruchový stav omezuje provoz metra, jelikož se musí jednotka metra odstavit v konečné stanici. Do této analýzy se musí započítat i poruchovost řídicí jednotky, která ovládá celou klimatizaci a při její poruše dojde k vypnutí klimatizační jednotky. U teplotních sensorů je předpokládáno, že ke ztrátě ohřevu stačí, když dojde k poruše dvou sensorů ze čtyř. Při sestavování FTA byly opět použity data ze spolehlivostní analýzy (Tabulka 4.4).

Tabulka 4.4 Spolehlivostní analýza pro úplnou ztrátu ohřevu <sup>9</sup>

Komponenta	Množství	Pracovní využití [%]	Intenzita poruch [FIT]
Topná tyč	8	50	120
Teplotní spínač	2	50	570
Tavná pojistka	2	50	54
Jistič topného tělesa	2	50	200
Stykač topného tělesa	2	50	300
Vysokonapěťová tavná pojistka	2	50	50
Elektronická řídící jednotka	1	100	4320
Ovládací člen klapky (chlazení – ohřev)	2	100	500
Teplotní sensor	4	100	525

Hodnota intenzity poruch poruchového stavu úplné ztráty ohřevu je 8640 FIT (viz. obrázek 4.5). Tento stav během životnosti pravděpodobně nastane 2krát (viz. vzorec 4.1). Dostáváme tedy stejnou pravděpodobnost poruchových stavů úplné a částečné ztráty ohřevu. Důvodem je vysoká hodnota intenzity poruch řídící jednotky, která není nikterak zálohována.



Obrázek 4.5 FTA úplné ztráty ohřevu *Autor*

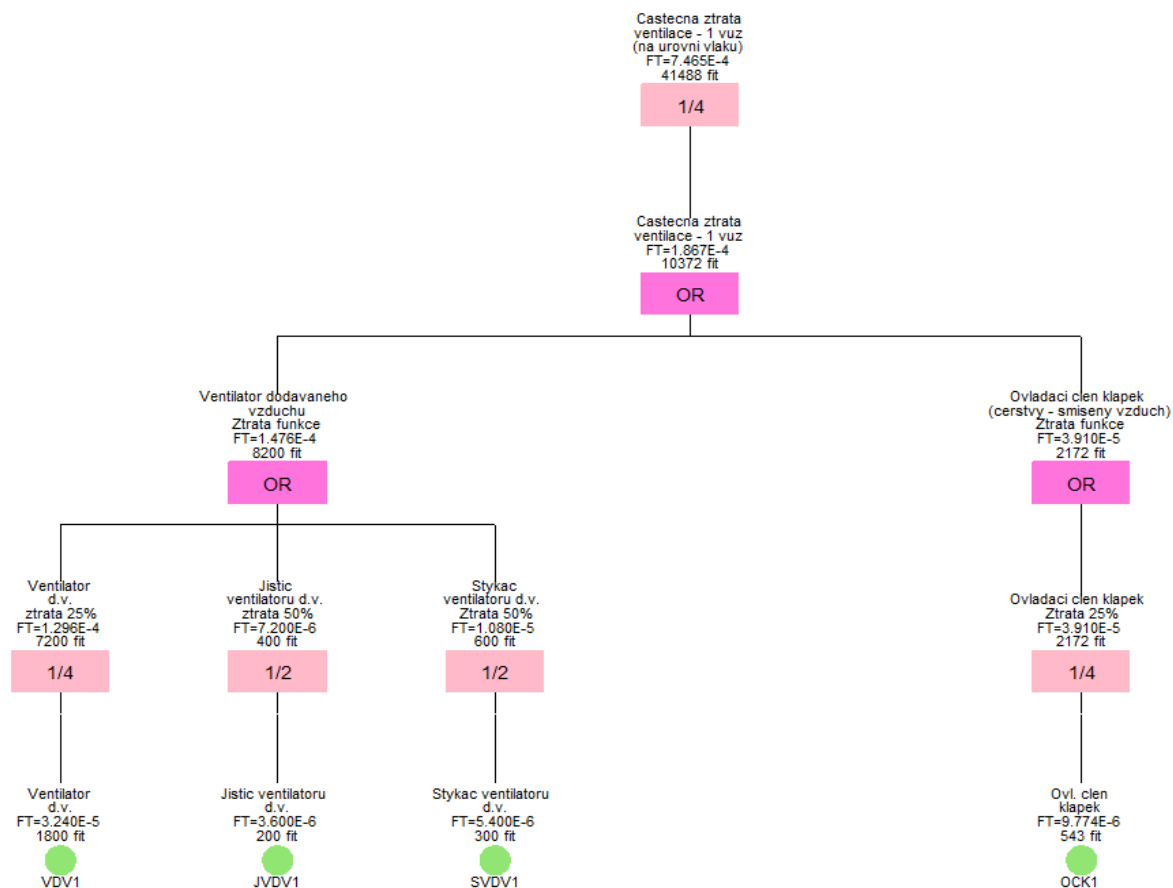
#### 4.1.4 Poruchový stav částečná ztráta ventilace (FTA)

K částečné ztrátě ventilace dojde v případě ztráty funkce jakékoliv komponenty, která se podílí na ventilaci (např. samotného ventilátoru, jističe ventilátoru atd.). Tato porucha neomezuje provoz a jestliže nedojde k jejímu odhalení, odstranění poruchy nastane až při další preventivní prohlídce. Při sestavování poruchového stromu byly použity data ze spolehlivostní analýzy komponent, které se podílejí na ventilaci.

Tabulka 4.5 Spolehlivostní analýza komponent ventilace <sup>6</sup>

Komponenta	Množství	Pracovní využití [%]	Počet poruch [FIT]
Ventilátor dodávaného vzduchu	4	100	1800
Jistič ventilátoru dodávaného vzduchu	2	100	200
Stykač ventilátoru dodávaného vzduchu	2	100	300
Ovládací člen klapek (čerstvý – smíšený vzduch)	4	100	543

Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav částečné ztráty ventilace je 41 488 FIT (viz. obrázek 4.6). Tento stav tedy nastane během životnosti metra pravděpodobně 10krát (viz. vzorec 4.1). Nejvíce tuto pravděpodobnost poruchy zvyšuje samotný ventilátor dodávaného vzduchu.

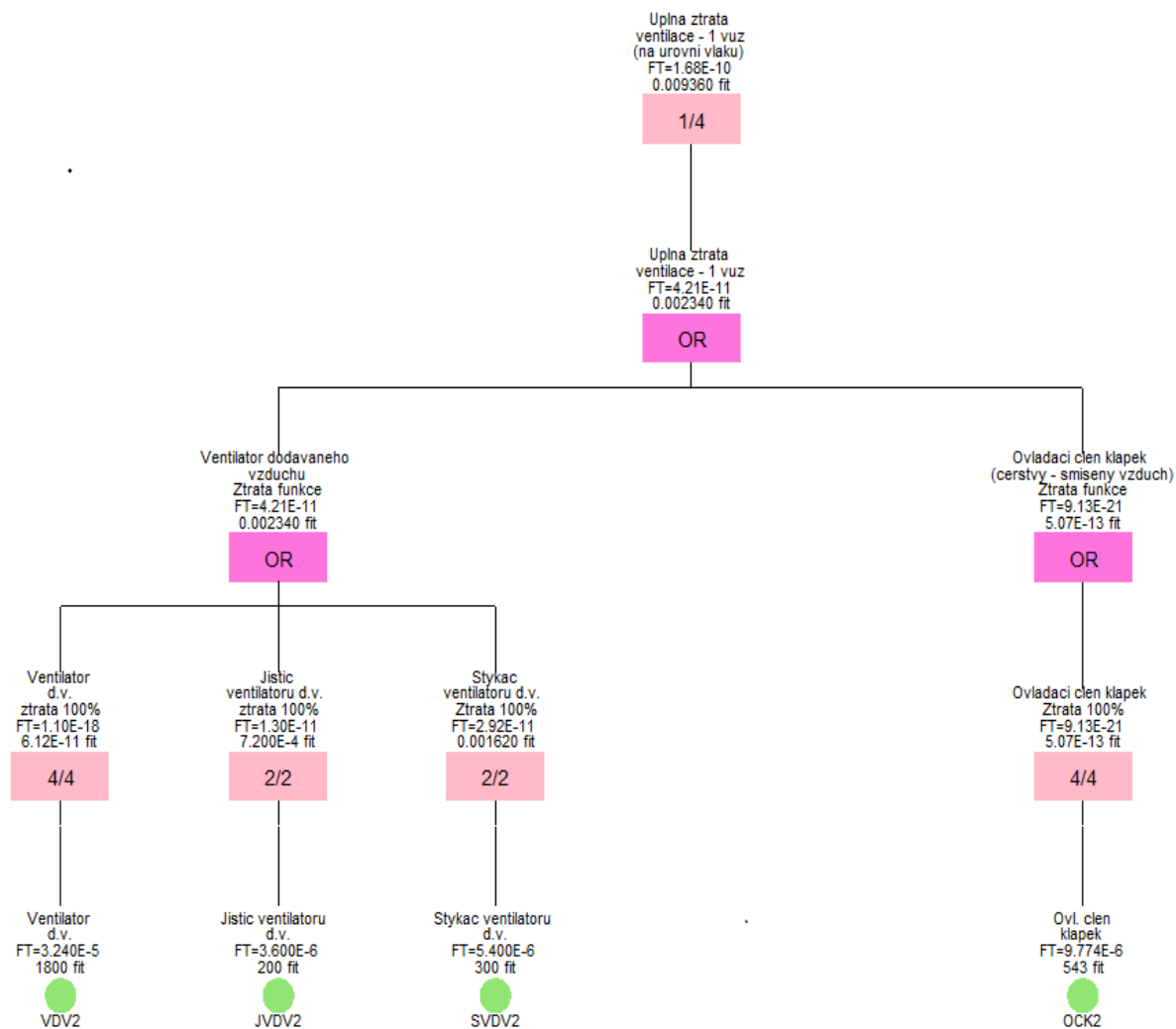


Obrázek 4.6 FTA částečné ztráty ventilace Autor

#### 4.1.5 Poruchový stav úplné ztráty ventilace (FTA)

K poruchovému stavu úplné ztráty ventilace dojde v případě selhání nadměrného množství komponent (např. všech ventilátorů, jističů ventilátorů atd.). Tato porucha omezuje provoz, jelikož dochází k odstavení metra na konečné stanici. Do této analýzy se nezahrnuje poruchovost řídicí jednotky, protože i přes její selhání se spustí nouzová ventilace. Při sestrojování FTA se opět vychází ze spolehlivostní analýzy jednotlivých komponent, které se podílí na ventilaci (viz. tabulka 4.5).

Pravděpodobnost poruchy a úplné selhání ventilace je 0,009 FIT (viz. obrázek 4.7). Je to naprosto zanedbatelná intenzita poruch a s jistotou můžeme říci, že za dobu provozu jednotky metra k této poruše nedojde, jelikož do analýzy nemusela být zahrnuta řídicí jednotka (jako u stavu úplné ztráty ohřevu). Samotný ventilátor dodávaného vzduchu je dostatečně zálohován.



Obrázek 4.7 FTA úplné ztráty ventilace *Autor*



## 4.2 Tabulkový přehled pravděpodobností poruch jednotlivých stavů

Pro lepší přehled byla sestavena tabulka, která obsahuje jednotlivé poruchové stavy a intenzity poruch.

Tabulka 4.6 Přehled poruchových stavů a jejich intenzity poruch <sup>Autor</sup>

Poruchový stav	Intenzita poruch [FIT]	Očekávaný počet poruch za životnost jednotky metra
Ztráta chlazení	33 811	8
Částečná ztráta ohřevu	8 536	2
Úplná ztráta ohřevu	8 640	2
Částečná ztráta ventilace	41 488	10
Úplná ztráta ventilace	0,009	0

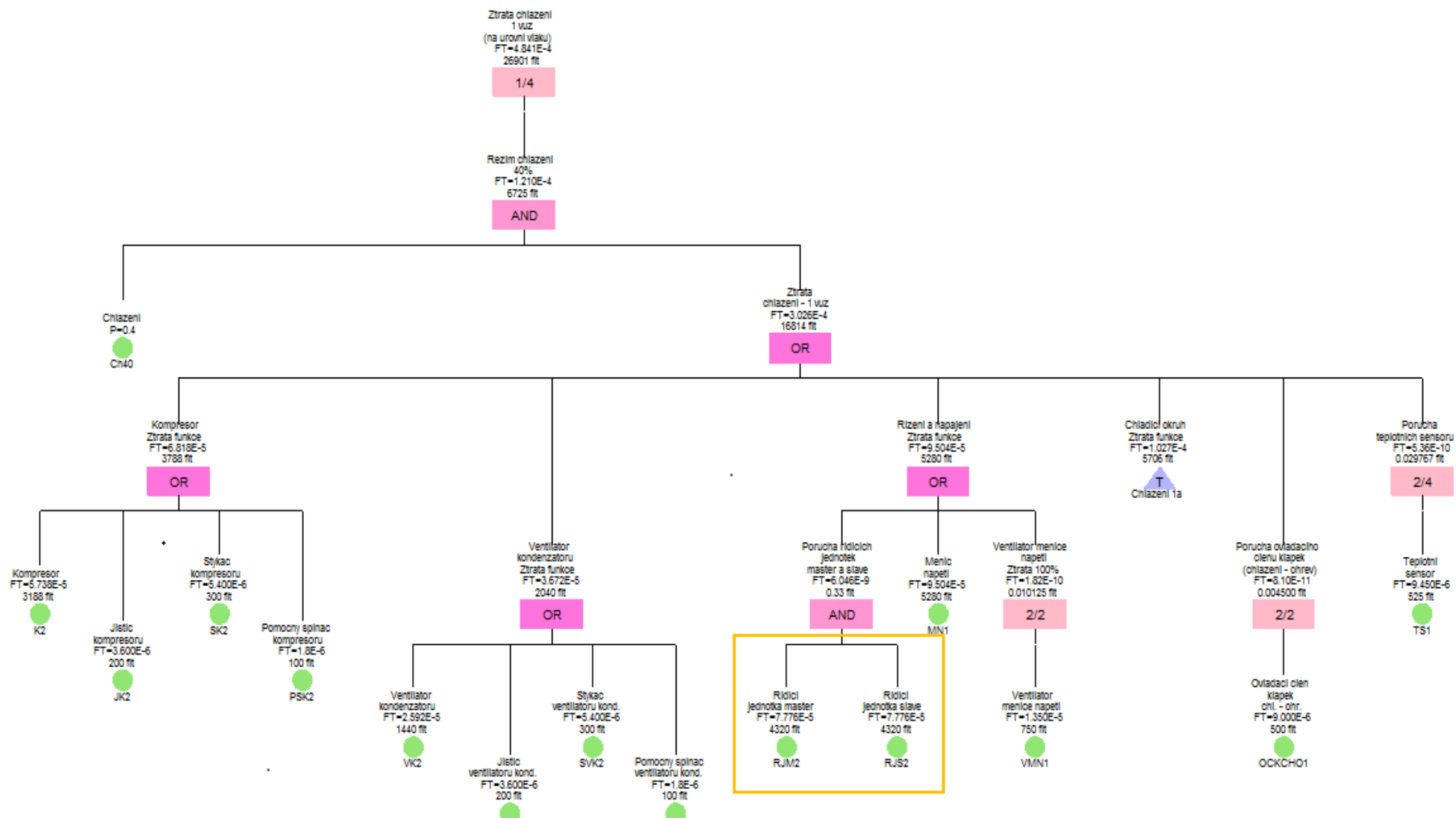
## 4.3 Návrh opatření pro zlepšení spolehlivosti klimatizace

K dosažení uspokojivějších výsledků v oblasti bezporuchovosti klimatizační jednotky byly provedeny návrhy na její zlepšení. Zaměřil jsem se na poruchové stavy, které přímo ovlivňují provoz metra, tj. ztráta klimatizace a úplná ztráta ohřevu.

### 4.3.1 Návrh opatření pro ztrátu chlazení

Při návrhu opatření se zaměříme na komponenty, které mají největší intenzitu poruch a podílí se na funkci chlazení (viz. tabulka 4.2). Téměř největší intenzitu poruch má elektronická řídicí jednotka, byl tedy proveden návrh na její zdvojení (master + slave). Pokud dojde k poruše jedné řídicí jednotky, funkci přebírá druhá řídicí jednotka. Dojde k zálohování kritické komponenty a tím zlepšení celkové bezporuchovosti režimu chlazení. Byl znovu proveden FTA, kde pomocí hradla AND zdvojíme komponentu řídicí jednotky.

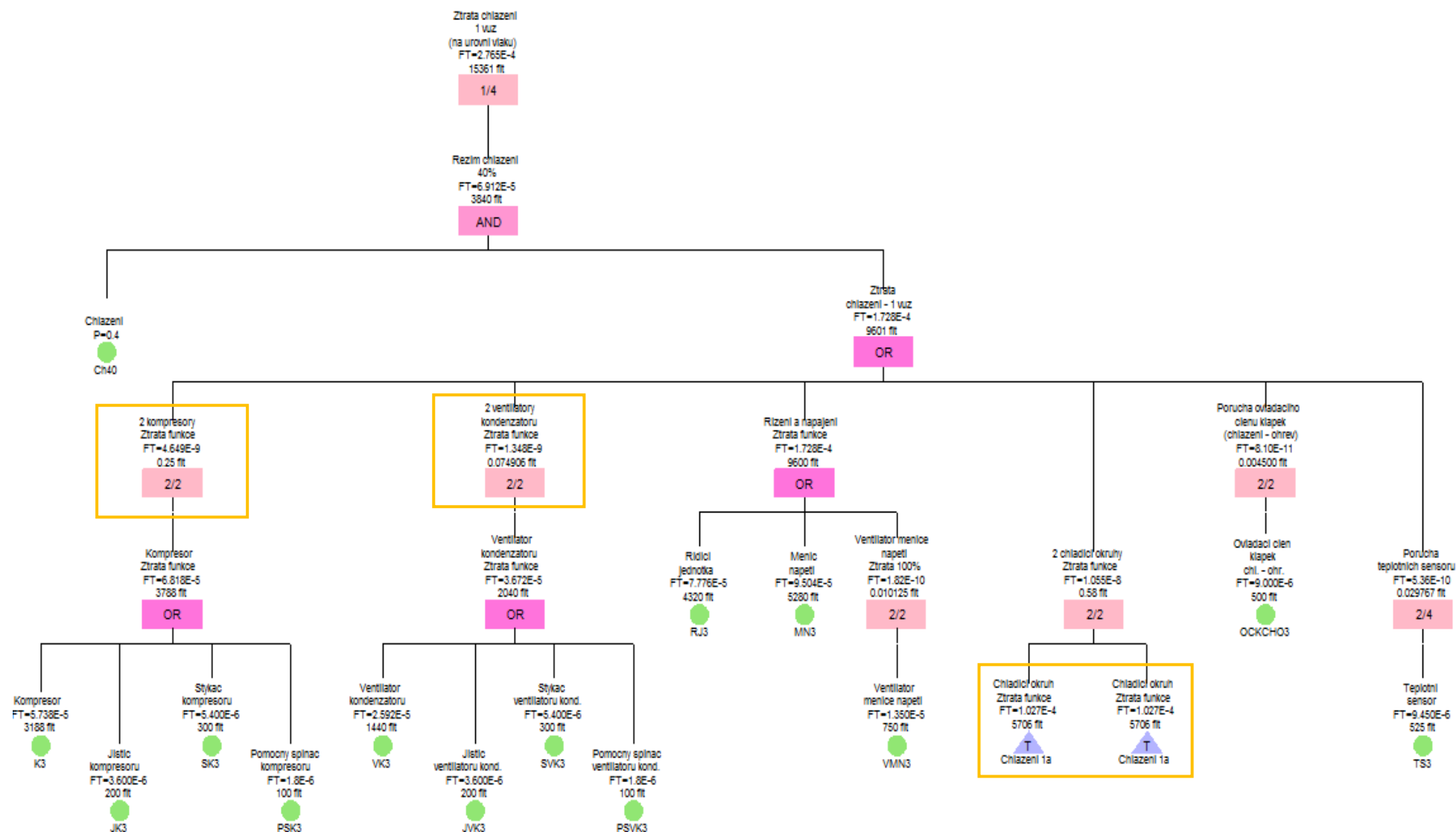
Výsledná hodnota intenzity poruch pro poruchový stav ztráty chlazení se zálohovanou řídicí jednotkou je 26 901 FIT (viz. obrázek 4.8). V přepočtu na dobu životnosti metra (viz. vzorec 4.1) byla snížena pravděpodobnost poruchy z původních osmi poruch na pouhých šest.



Obrázek 4.8 FTA ztráty chlazení (master + slave) Autor

Dále byl zanalyzován odlišný návrh na zdvojení celého chladicího okruhu. Dojde ke zdvojení všech komponent, které se přímo podílí na režimu chlazení. Poté výpadek jednoho chladicího okruhu má za následek pouze 50 % ztrátu výkonu. Při poruše tedy zcela neztratíme funkční režim chlazení. Toto opatření zaručí lepší spolehlivost než předešlý návrh zdvojení řídicích jednotek.

Výsledná hodnota pravděpodobnosti poruch pro toto opatření je 15 361 FIT (viz. obrázek 4.9). Očekávaný počet poruch chladicí jednotky se tak sníží z původní hodnoty 33 811 FIT více než dvojnásobně.

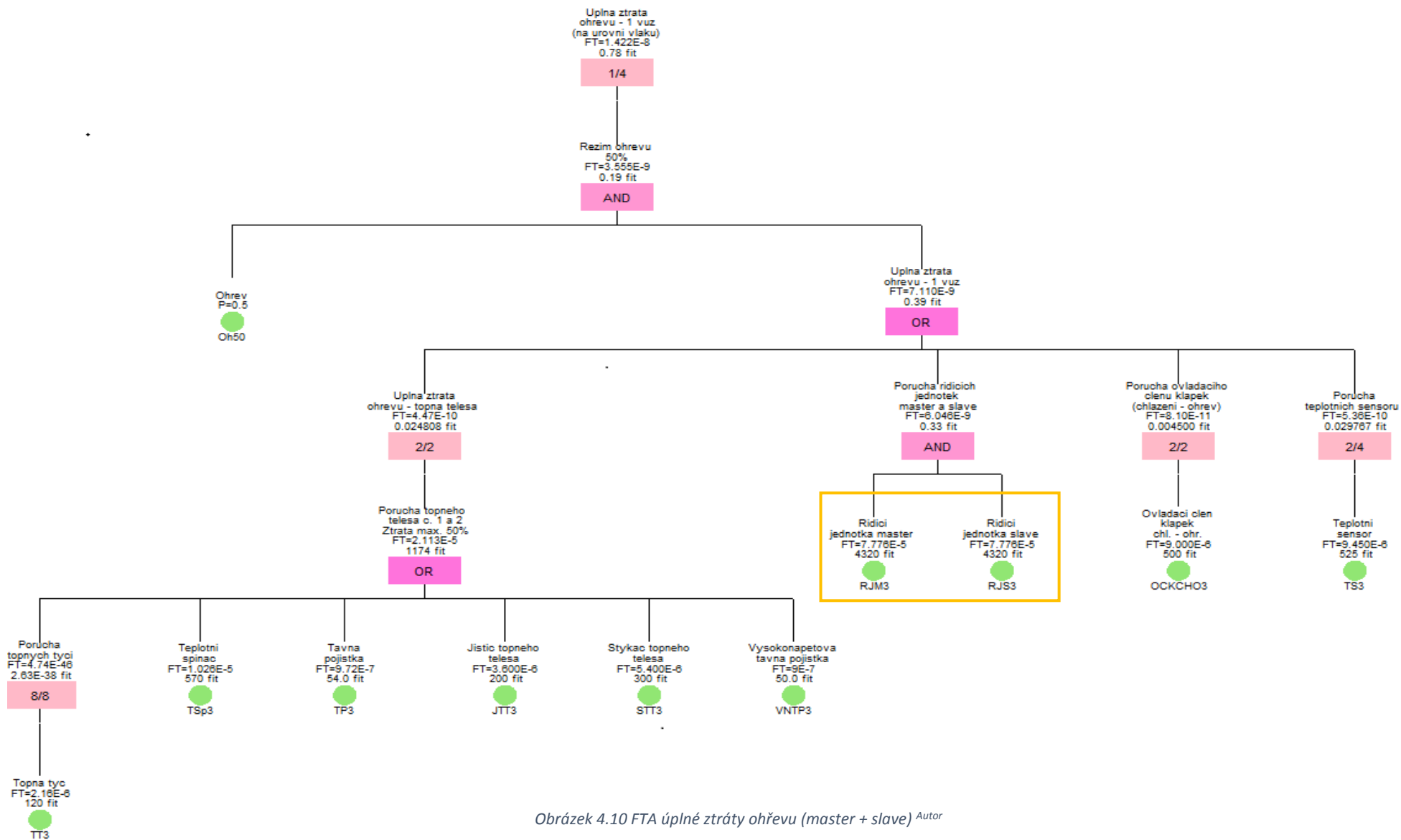


Obrázek 4.9 FTA ztráty chlazení (dva chladicí okruhy) Autor

#### 4.3.2 Návrh opatření pro úplnou ztrátu ohřevu

Při návrhu opatření tohoto poruchového stavu využijeme data ze spolehlivostní analýzy komponent (viz. tabulka 4.4). Stejně jako u návrhu zálohování chlazení i zde byl vybrán komponent s největší intenzitou poruch. Ze spolehlivostní analýzy vyplývá, že nejporuchovější komponenta je elektronická řídicí jednotka. Do FTA tedy zakomponujeme její zdvojení.

Výsledná hodnota intenzity poruch úplné ztráty ohřevu při zdvojené řídicí jednotce je 1 FIT (viz. obrázek 4.10). Tímto opatřením bylo téměř znemožněno, aby nastal poruchový stav úplné ztráty ohřevu během životnosti jednotky metra.



Obrázek 4.10 FTA úplné ztráty ohřevu (master + slave) Autor

## 5 Stanovení nákladů na údržbu u systému klimatizace

Stanovení nákladů životního cyklu (LCC) u systému klimatizace vychází z parametrů získaných od výrobců jednotlivých komponentů. Výpočet nákladů byl proveden pro preventivní i korektivní údržbu.

Pro porovnání obou typů údržby byly vytvořeny grafy celkových nákladů během celkové životnosti vozidla. Pro oba typy údržby byl zkonstruován graf ročních nákladů pro předpokládanou životnost jednotky. Všechny náklady jsou uvedeny v eurech. Tabulky a grafy pro výpočet nákladů životního cyklu klimatizační jednotky byly vytvořeny v programu MS Excel.

### 5.1 Výpočet nákladů preventivní údržby

Jak již bylo zmíněno výše, výpočet LCC vychází z předpokládané spolehlivosti jednotlivých komponent dané výrobcem. Ve vytvořené tabulce jsou rozděleny jednotlivé části klimatizační jednotky a jejich komponentů. U každé komponenty je uvedeno její množství, její celkové vytížení během provozu, interval údržby a servisní činnost, která se provádí při preventivní údržbě. Také je u každé komponenty doplněn údaj potřebný k výpočtu ceny práce pracovníků údržby a celková cena komponenty (tzv. náklady na materiál).

Tabulka 5.1 Intervaly údržby a ceny komponent preventivní údržby <sup>6</sup>

Komponenta	Množství	Pracovní cyklus [%]	Interval údržby	Servisní činnost	Pracovní zátěž [osmin]	Cena materiálů [EUR]
Klimatizační jednotka	1	-	12 měsíců	Roční kontrola: -vizuální kontrola -kontrola netěsností - funkční test	80	-
Klimatizační jednotka	1	-	12 měsíců	Roční čištění	40	-
Klimatizační jednotka	1	-	180 měsíců	Demontáž a reinstalace	120	-
<b>Chladicí jednotka</b>						
Větrák kondenzátoru	1	40	30 000 hodin	Výměna ložisek	105	260
Větrák kondenzátoru	1	40	90 000 hodin	Výměna	60	1 050
Kompresor	1	-	180 měsíců	Výměna	180	2 350
Tlumič vibrací kompresoru	4	-	180 měsíců	Výměna	5	40
Expanzní ventil	2	-	180 měsíců	Výměna	25	40
Vysoušeč filtrů	1	-	180 měsíců	Výměna	20	25
Elektromagnetický ventil	2	-	180 měsíců	Výměna	15	75
Elektromagnetická cívka	2	-	180 měsíců	Výměna	15	50
Inspekční skříčko	1	-	180 měsíců	Výměna	15	15
Zpětný ventil	1	-	180 měsíců	Výměna	15	55
Vysokotlaký spínač	1	-	180 měsíců	Výměna	15	35
Vysokotlaký sensor	1	-	180 měsíců	Výměna	5	60
Nízkotlaký spínač	1	-	180 měsíců	Výměna	15	35
Nízkotlaký sensor	1	-	180 měsíců	Výměna	5	60
Pružná trubice vysokotlaká	1	-	180 měsíců	Výměna	15	75
Pružná trubice nízkotlaká	1	-	180 měsíců	Výměna	15	45
<b>Jednotka pro úpravu vzduchu</b>						
Vzduchový filtr	6	-	3 měsíce	Výměna	2	12
Teplotní sensor	4	-	12 měsíců	Vizuální kontrola, funkční test	5	-
Ovládací člen klapky (čerstvý – smíšený vzduch)	4	100	50 000 hodin	Výměna	30	170
Ventilátor dodávaného vzduchu	4	100	50 000 hodin	Výměna	20	390
Topné těleso	2	-	180 měsíců	Demontáž a reinstalace pro výměnu topné tyče	35	-
Topná tyč	16	-	180 měsíců	Výměna	10	225
Teplotní spínač	2	-	180 měsíců	Výměna	10	22
Tavná pojistka	2	-	48 měsíců	Výměna	20	35
Vysokonapěťová teplotní pojistka	2	-	90 měsíců	Výměna	20	240
Ovládací člen klapky (chlazení – ohřev)	2	100	50 000 hodin	Výměna	30	320
<b>Elektronická jednotka</b>						
Stykač kompresoru	1	-	180 měsíců	Výměna	20	65
Pomocný spínač kompresoru	1	-	180 měsíců	Výměna	20	5
<b>Další komponenty</b>						
Teplotní sensor ve voze	4	-	12 měsíců	Vizuální kontrola	5	
Tlumič vibrací jednotky	8	-	180 měsíců	Výměna	5	95



Následuje výpočet četností těchto úkonů preventivní údržby za dobu provozu jednotky metra. Jestliže známe předpokládanou délku provozu jednotky metra (a tedy i klimatizační jednotky) a interval údržby jednotlivých komponent, četnost údržby vypočteme vydělením těchto dvou čísel. Musíme ovšem brát v potaz, že údržba už neproběhne poslední rok po skončení životnosti metra.

$$U_P = \frac{\check{Z} \cdot 12}{I_{m\check{s}}} - 1 \quad (5.1)$$

kde:

$U_P$  – četnost preventivní údržby komponentů za dobu provozu

$I_{m\check{s}}$  – interval preventivní údržby [měsíc]

$\check{Z}$  – předpokládaná životnost jednotky metra [roky]

U výpočtu četností, kde je interval údržby zadáný v hodinách, vynásobíme životnost jednotky metra roční dobou, kdy je metro pod napětím. Předpokládáme tedy, že metro je v provozu 6000 hodin ročně.

$$U_P = \frac{\check{Z} \cdot R}{I_{hod}} \quad (5.2)$$

kde:

$I_{hod}$  – interval preventivní údržby [hod]

$R$  – doba napájení metra za rok [hod]

Při výpočtu četností údržby u komponent, které nemají 100 % využití po celou dobu jejich provozu (např. větrák kondenzátoru), musíme daným provozním využitím vypočítanou četnost vynásobit (viz. vzorec 5.3).

$$U_p = \frac{\check{Z} \cdot R}{I_{hod}} \cdot V \quad (5.3)$$

kde:

V –pracovní využití komponenty po dobu její životnosti [%]

Po výpočtu četností byl proveden samotný výpočet nákladů na práci zaměstnanců údržby a nákladů na materiál. Výpočet je proveden opět pro každou komponentu klimatizace. Při predikci nákladů na práci je brán zřetel na množství komponenty, pro kterou byl proveden výpočet a hodinová mzda dělníků (60 EUR). Dané pracovní zátěže a ceny materiálů platí právě pro jedno množství počítané komponenty.

$$P_{PU1} = \sum_{i=1}^n U_{Pi} \cdot \frac{P_{zi}}{60} \cdot M \cdot Z_i \quad (5.4)$$

kde:

$P_{PU1}$  – náklady na práci preventivní údržby jednoho vozidla [EUR]

$P_{zi}$  – pracovní zátěž i-té komponenty[osmin]

M – hodinová mzda pracovníků údržby [EUR]

$Z_i$  – množství i-té komponenty v klimatizační jednotce

n – počet komponent v klimatizační jednotce

Náklady na práci celé jednotky metra dostaneme, když náklady na práci vynásobíme počtem vozidel, v tomto případě obsahuje jednotka čtyři vozidla metra.

$$P_{PU} = P_{PU1} \cdot m \quad (5.5)$$

kde:

$P_{PU}$  – celkové náklady na práci preventivní údržby pro jedno vozidlo [EUR]

n – počet komponent preventivní údržby v klimatizaci

$m$  – počet vozidel v jednotce metra

Vztah pro výpočet nákladů na materiál sestavíme obdobně, zahrneme množství komponenty v klimatizaci, četnost její údržby a samotnou cenu komponenty.

$$M_{PU1} = Z \cdot U_P \cdot C_M \quad (5.6)$$

kde:

$M_{PU1}$  – náklady na práci preventivní údržby pro jednu komponentu [EUR]

$C_M$  – cena materiálu [EUR]

Analogicky byl proveden výpočet pro celkovou sumu nákladů na materiál pro celou jednotku metra. Celkové náklady jednotky metra dostanu vynásobením počtem vozidel.

$$M_{PU} = m \cdot \sum_{i=1}^n M_{PU1i} \quad (5.7)$$

kde:

$M_{PU}$  – celkové náklady na materiál jednotky metra [EUR]

$M_{PU1i}$  – náklady na práci preventivní údržby  $i$ -té komponenty [EUR]

Celkové náklady preventivní údržby klimatizační jednotky metra byly vypočtené součtem nákladů na práci a materiál preventivní údržby (viz. vzorec 3.1).

Tabulka 5.2 Náklady na práci a materiál preventivní údržby *Autor*

Komponenta	Množství	Pracovní zátěž [osmin]	Cena materiálů [EUR]	Četnost údržby	Náklady na práci [EUR]	Náklady na materiál [EUR]	Náklady materiál + práce [EUR]
Klimatizační jednotka	1	80	-	39	3120	0	3120
Klimatizační jednotka	1	40	-	39	1560	0	1560
Klimatizační jednotka	1	120	-	2	240	0	240
Chladicí jednotka							
Větrák kondenzátoru	1	105	260	3	315	780	1095
Větrák kondenzátoru	1	60	1 050	1	60	1050	1110
Kompresor	1	180	2 350	2	360	4700	5060
Tlumič vibrací kompresoru	4	5	40	2	40	320	360
Expanzní ventil	2	25	40	2	100	160	260
Vysoušeč filtrů	1	20	25	2	40	50	90
Elektromagnetický ventil	2	15	75	2	60	300	360
Elektromagnetická cívka	2	15	50	2	60	200	260
Inspekční skříčko	1	15	15	2	30	30	60
Zpětný ventil	1	15	55	2	30	110	140
Vysokotlaký spínač	1	15	35	2	30	70	100
Vysokotlaký sensor	1	5	60	2	10	120	130
Nízkotlaký spínač	1	15	35	2	30	70	100
Nízkotlaký sensor	1	5	60	2	10	120	130
Pružná trubice vysokotlaká	1	15	75	2	30	150	180
Pružná trubice nízkotlaká	1	15	45	2	30	90	120
Jednotka pro úpravu vzduchu							
Vzduchový filtr	6	2	12	159	1908	11448	13356
Teplotní senzor	4	5	-	39	780	-	780
Ovládací člen klapek (čerstvý – smíšený vzduch)	4	30	170	4	480	2720	3200
Ventilátor dodávaného vzduchu	4	20	390	4	320	6240	6560
Topné těleso	2	35	-	2	140	-	140
Topná tyč	16	10	225	2	320	7200	7520
Teplotní spínač	2	10	22	2	40	88	128
Tavná pojistka	2	20	35	9	360	630	990
Vysokonapěťová teplotní pojistka	2	20	240	5	200	2400	2600
Ovládací člen klapek (chlazení – ohřev)	2	30	320	4	240	2560	2800
Elektronická jednotka							
Stykač kompresoru	1	20	65	2	40	130	170
Pomocný spínač kompresoru	1	20	5	2	40	10	50
Další komponenty							
Teplotní sensor ve voze	4	5	-	39	780	-	780
Tlumič vibrací jednotky	8	5	95	2	80	1520	1600
			Náklady celkem [EUR]		11883	43266	
Celkové náklady preventivní údržby systému klimatizace 1 vozidla [EUR]					55149		

## 5.2 Výpočet nákladů korektivní údržby

U výpočtů nákladů korektivní údržby vycházíme z předpokládaných četností poruch jednotlivých komponent, které jsou dány výrobcem. V tabulce lze opět najít množství komponenty v klimatizační jednotce, pracovní cyklus komponenty, pracovní zátěž zaměstnanců údržby a cenu materiálů jednotlivých komponent. Nově je zde uvedena poruchovost, která udává pravděpodobnost počtu poruch komponenty.

Tabulka 5.3 Přehled komponent korektivní údržby *Autor*

Komponenta	Množství	Pracovní cyklus [%]	Poruchovost [FIT]	Pracovní zátěž [man min]	Cena materiálů [EUR]
<b>Chladicí jednotka</b>					
Kompresor	1	40	4 250	600	2 350
Kondenzátor	2	100	80	480	780
Výparník	2	100	80	480	530
Expanzní ventil	2	100	700	480	40
Vysoušeč filtru	1	100	520	480	25
Elektromagnetický ventil	2	100	750	480	75
Elektromagnetická cívka	2	100	250	30	50
Inspekční skříčko	1	100	370	480	15
Oddělovač chladiva	1	100	100	480	75
Kolektor chladiva	1	100	90	480	375
Zpětný ventil	1	100	65	480	55
Vysokotlaký spínač	1	100	520	480	35
Vysokotlaký sensor	1	100	500	30	60
Nízkotlaký spínač	1	100	520	480	35
Nízkotlaký sensor	1	100	500	30	60
Pružná trubice vysokotlaká	1	100	350	480	75
Pružná trubice nízkotlaká	1	100	350	480	45
Ventilátor kondenzátoru	1	40	1 800	60	1 050
Tlumič vibrací kondenzátoru	4	100	250	360	40
<b>Jednotka pro úpravu vzduchu</b>					
Ventilátor dodávaného vzduchu	4	100	1 800	30	545
Ovládací člen klapky (čerstvý – smíšený vzduch)	4	100	1 085	30	170
Topná tyč	16	50	200	240	225
Teplotní spínač	2	50	570	30	22
Tavná pojistka	2	50	90	20	35
Teplotní sensor	4	100	700	30	25
Ovládací člen klapky (chlazení – ohřev)	2	100	1 000	30	320
<b>Elektronická jednotka</b>					
Elektronická řídicí jednotka	1	100	4 800	30	1 200
Měnič napětí	1	40	6 600	65	8 240
Ventilátor měniče napětí	2	40	1 500	20	25
Jistič kompresoru	1	40	200	20	50
Pomocný spínač kompresoru	1	40	100	20	5
Stykač kompresoru	1	40	300	20	65
Jistič ventilátoru kondenzátoru	1	40	200	20	50
Pomocný spínač ventilátoru kondenzátoru	1	40	100	20	5
Stykač ventilátoru kondenzátoru	1	40	300	20	35
Jistič ventilátoru dodávaného vzduchu	2	100	200	20	60
Stykač ventilátoru dodávaného vzduchu	2	100	300	20	140
Jistič topného tělesa	2	50	200	20	120
Stykač topného tělesa	2	50	300	20	80
Vysokonapěťová tavná pojistka	2	50	50	20	240
<b>Další komponenty</b>					
Teplotní sensor interiéru	4	100	700	30	25
Tlumič vibrací klimatizace	8	100	300	120	95

Byly vypočítány předpokládané počty poruch jednotlivých komponent. U výpočtu použijeme hodnotu intenzity poruch, životnost jednotky metra a dobu napájení metra za rok. Je-li třeba, výslednou hodnotu vynásobíme pracovním cyklem.

$$K_p = \frac{F}{10^9} \cdot R \cdot \check{Z} \cdot V \quad (5.8)$$

kde:

$K_p$ - domnělý počet poruch jednotlivé komponenty

F – intenzita poruch za miliardu hodin [FIT]

R – doba napájení metra za rok [hod]

$\check{Z}$  – celková životnost metra [rok]

V – pracovní využití komponenty [%]

Dále jsem určil náklady na práci zaměstnanců v případě poruchy komponenty. V rovnici počítáme s předpokládaným počtem poruch prvku, pracovní zátěží a hodinovou mzdou.

$$P_{KU1} = \sum_{i=1}^n K_{pi} \cdot \frac{P_{zi}}{60} \cdot M \quad (5.9)$$

kde:

$P_{KU1}$  – náklady korektivní údržby na práci jednoho vozidla [EUR]

$K_p$ - předpokládaný počet poruch i-té komponenty

$P_{zi}$  – pracovní zátěž i-té komponenty [os min]

M – hodinová mzda zaměstnanců [EUR]

n – počet komponent korektivní údržby v klimatizaci

Pro výpočet nákladů na práci korektivní údržby jednotky metra vynásobíme pracovní náklady korektivní údržby jednoho vozidla počtem vozidel metra.

$$P_{KU} = m \cdot P_{KU1} \quad (5.10)$$

kde:

$m$  – počet vozidel jednotky metra

Materiální náklady korektivní údržby byly vypočteny analogicky jako u údržby preventivní. Ve vzorci pro materiální náklady jedné komponenty jsou tedy použity četnosti poruch komponenty, její cena a množství.

$$M_{KU1} = K_p \cdot C_M \cdot Z \quad (5.11)$$

kde:

$M_{KU1}$  - materiální náklady jedné komponenty [EUR]

$K_p$  – pravděpodobný počet poruch komponenty

$C_M$  – cena počítané komponenty [EUR]

$Z$  – množství komponenty v klimatizační jednotce

Celková suma nákladů na materiál jednotky metra byla opět vypočtena součtem nákladů jednotlivých komponent klimatizace, který byl vynásoben počtem vozidel v jednotce metra.

$$M_{KU} = m \cdot \sum_{i=1}^n M_{KU1i} \quad (5.12)$$

kde:

$M_{KU}$  – celkové náklady jednotky metra na materiál korektivní údržby

$M_{KU1}$  - materiální náklady i-té komponenty [EUR]

$m$  – počet vozidel v jednotce metra

$n$  – celkový počet komponent pro korektivní údržbu klimatizace

Celkové náklady korektivní údržby klimatizační jednotky jednoho vozidla metra byly vypočteny pomocí vztahu (viz. vzorec 3.2) a jejich hodnota činí 10 852 euro (viz. tab. 5.4).

Tabulka 5.4 Tabulka nákladů korektivní údržby

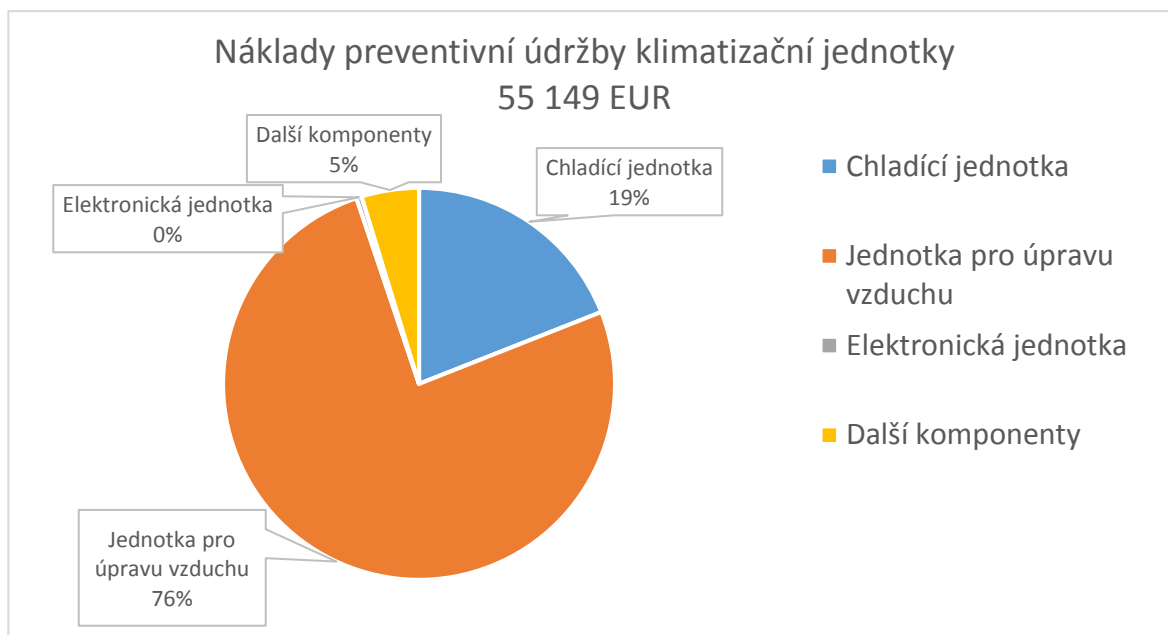
Komponenta	Množství	Pracovní zátěž [man min]	Cena materiálů [EUR]	Počet poruch	Náklady na práci [EUR]	Materiální náklady [EUR]	Náklady korektivní údržby [EUR]
<b>Chladicí jednotka</b>							
Kompresor	1	600	2 350	0,408	244,8	958,8	1203,6
Kondenzátor	2	480	780	0,0192	18,432	29,952	48,384
Výparník	2	480	530	0,0192	18,432	20,352	38,784
Expanzní ventil	2	480	40	0,168	161,28	13,44	174,72
Vysoušeč filtru	1	480	25	0,1248	59,904	3,12	63,024
Elektromagnetický ventil	2	480	75	0,18	172,8	27	199,8
Elektromagnetická cívka	2	30	50	0,06	3,6	6	9,6
Inspekční skříčko	1	480	15	0,0888	42,624	1,332	43,956
Oddělovač chladiva	1	480	75	0,024	11,52	1,8	13,32
Kolektor chladiva	1	480	375	0,0216	10,368	8,1	18,468
Zpětný ventil	1	480	55	0,0156	7,488	0,858	8,346
Vysokotlaký spínač	1	480	35	0,1248	59,904	4,368	64,272
Vysokotlaký sensor	1	30	60	0,12	3,6	7,2	10,8
Nízkotlaký spínač	1	480	35	0,1248	59,904	4,368	64,272
Nízkotlaký sensor	1	30	60	0,12	3,6	7,2	10,8
Pružná trubice vysokotlaká	1	480	75	0,084	40,32	6,3	46,62
Pružná trubice nízkotlaká	1	480	45	0,084	40,32	3,78	44,1
Ventilátor kondenzátoru	1	60	1 050	0,1728	10,368	181,44	191,808
Tlumič vibrací kondenzátoru	4	360	40	0,06	86,4	9,6	96
<b>Jednotka pro úpravu vzduchu</b>							
Ventilátor dodávaného vzduchu	4	30	545	0,432	51,84	941,76	993,6
Ovládací člen klapky (čerstvý – smíšený vzduch)	4	30	170	0,2604	31,248	177,072	208,32
Topná tyč	16	240	225	0,024	92,16	86,4	178,56
Teplotní spínač	2	30	22	0,0684	4,104	3,0096	7,1136
Tavná pojistka	2	20	35	0,0108	0,432	0,756	1,188
Teplotní sensor	4	30	25	0,168	20,16	16,8	36,96
Ovládací člen klapky (chlazení – ohřev)	2	30	320	0,24	14,4	153,6	168
<b>Elektronická jednotka</b>							
Elektronická řídicí jednotka	1	30	1 200	1,152	34,56	1382,4	1416,96
Měnič napětí	1	65	8 240	0,6336	41,184	5220,864	5262,048
Ventilátor měniče napětí	2	20	25	0,144	5,76	7,2	12,96
Jistič kompresoru	1	20	50	0,0192	0,384	0,96	1,344
Pomocný spínač	1	20	5	0,0096	0,192	0,048	0,24
Stykač kompresoru	1	20	65	0,0288	0,576	1,872	2,448
Jistič ventilátoru	1	20	50	0,0192	0,384	0,96	1,344
Pomocný spínač ventilátoru kondenzátoru	1	20	5	0,0096	0,192	0,048	0,24
Stykač ventilátoru konden.	1	20	35	0,0288	0,576	1,008	1,584
Jistič ventilátoru dodávaného vzduchu	2	20	60	0,048	1,92	5,76	7,68
Stykač ventilátoru dodáv.	2	20	140	0,072	2,88	20,16	23,04
Jistič topného tělesa	2	20	120	0,024	0,96	5,76	6,72
Stykač topného tělesa	2	20	80	0,036	1,44	5,76	7,2
Vysokonapěťová tavná	2	20	240	0,006	0,24	2,88	3,12
<b>Další komponenty</b>							
Teplotní sensor interiéru	4	30	25	0,168	20,16	16,8	36,96
Tlumič vibrací klimatizace	8	120	95	0,072	69,12	54,72	123,84
<b>Náklady celkem [EUR]</b>					<b>1450,54</b>	<b>9401,61</b>	
<b>Celkové náklady korektivní údržby systému klimatizace 1 vozidla [EUR]</b>						<b>10852,14</b>	



### 5.3 Grafické vyjádření nákladů životního cyklu

Pro lepší přehled a snadnější porovnání nákladů byly zkonstruovány koláčové grafy pro náklady preventivní i korektivní údržby. Pro srovnání těchto dílčích nákladů byl vytvořen i graf nákladů celkových.

Předpokládané náklady preventivní údržby jedné klimatizační jednotky činí 55 149 EUR. Největší část těchto nákladů tvoří jednotka pro úpravu vzduchu, která odpovídá 76 % z celkových nákladů preventivní údržby klimatizace. Je to z důvodu časté výměny vzduchových filtrů, topných tyčí a údržby ventilátorů dodávaného vzduchu. Následují náklady na chladicí jednotku, kde je nejnákladnější údržba kompresoru. Náklady dalších komponent můžeme zanedbat. Elektronickou jednotku neplánujeme preventivně udržovat (viz. kapitola 2.1).



Obrázek 5.1 Náklady preventivní údržby klimatizační jednotky *Autor*

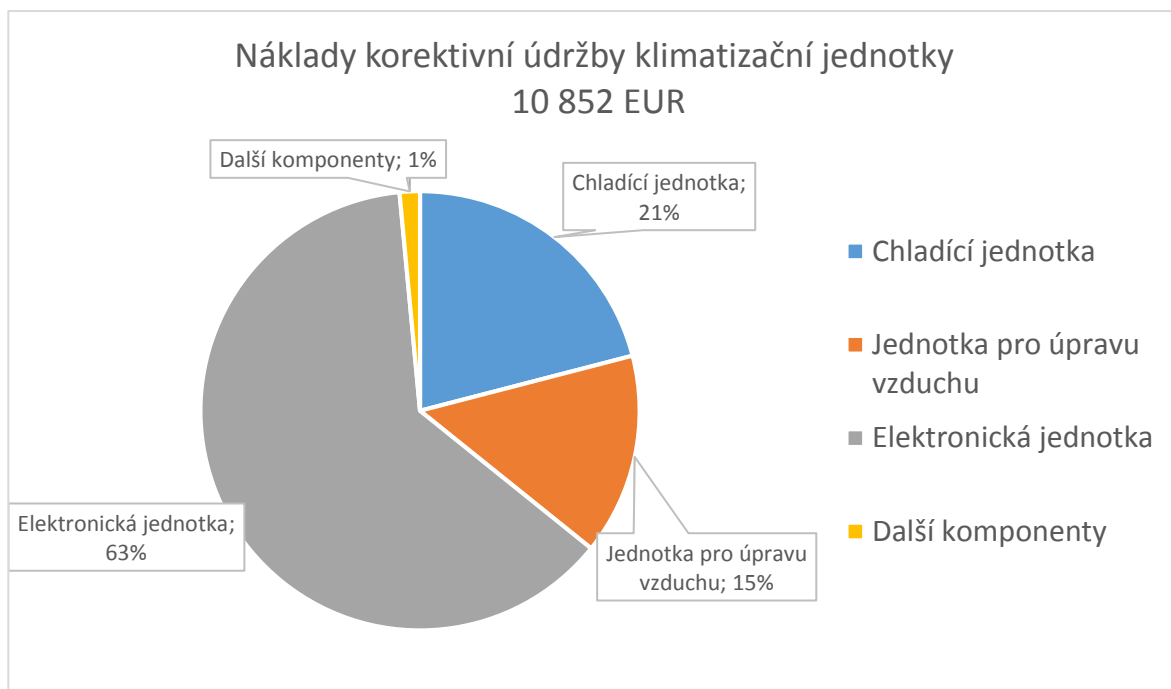
Pro zajímavost a možné úspory do budoucna byly vybrány suverénně nejnákladnější komponenty na údržbu (tzv. kritické prvky). Jedná se o kompresor, vzduchové filtry, ventilátory vzduchu a topné tyče. Provedeme analýzu jejich podílu na celkové sumě preventivní údržby.

Tabulka 5.5 Tabulka kritických prvků preventivní údržby *Autor*

Komponenta	Náklady na preventivní údržbu komponenty [EUR]	Celkové náklady preventivní údržby [EUR]	Podíl komponenty z celkové sumy preventivní údržby [%]
Kompresor	5060	55 149	9,2
Vzduchový filtr	13 356		24,2
Ventilátor vzduchu	6560		11,9
Topná tyč	7520		13,6

Z tabulky výše vyplývá, že skoro čtvrtinové náklady z celkové ceny na preventivní údržbu tvoří výměna vzduchových filtrů. Údržba topných tyčí tvoří 13,6 %, ventilátoru vzduchu 11,9 % a údržba kompresoru tvoří 9,2 % z celkové částky nákladů preventivní údržby.

Celkové předpokládané náklady korektivní údržby jedné jednotky klimatizace jsou 10 852 EUR. Opačně, než u preventivní údržby má zde elektronická jednotka největší podíl z celkových nákladů korektivní údržby, a to 63 %. V elektronické jednotce naprosto dominuje, co se týče ceny na údržbu, elektronická řídicí jednotka a měnič napětí (viz. tabulka 5.4). Následuje chladicí jednotka s 21 % a jednotka pro úpravu vzduchu s 15 % z celkových údržbových nákladů.



Obrázek 5.2 Náklady korektivní údržby klimatizační jednotky *Autor*

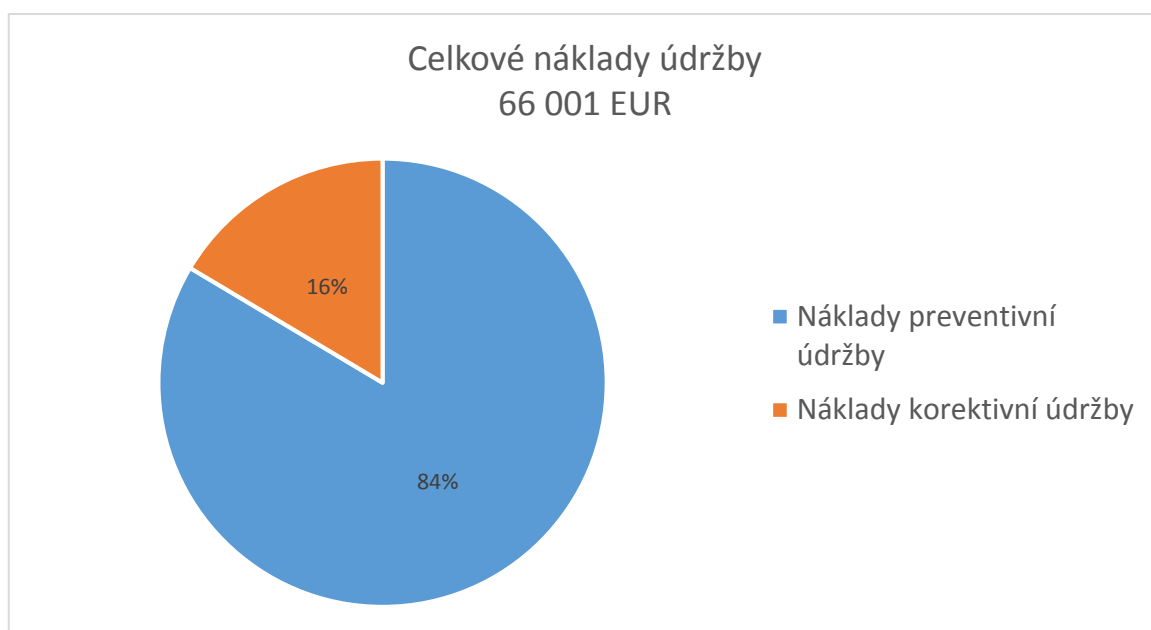
Stejně jako u preventivní údržby i zde byly pro porovnání vybrány kritické prvky korektivní údržby. Jedná se o kompresor, ventilátor vzduchu, elektronická řídicí jednotka a měnič napětí.

Tabulka 5.6 Tabulka kritických prvků korektivní údržby *Autor*

Komponenta	Náklady na korektivní údržbu komponenty [EUR]	Celkové náklady korektivní údržby [EUR]	Podíl komponenty z celkové sumy korektivní údržby [%]
Kompresor	1204	10852	11,1
Ventilátor vzduchu	993		9,2
Elektronická řídicí	1417		13
Měnič napětí	5262		48,5

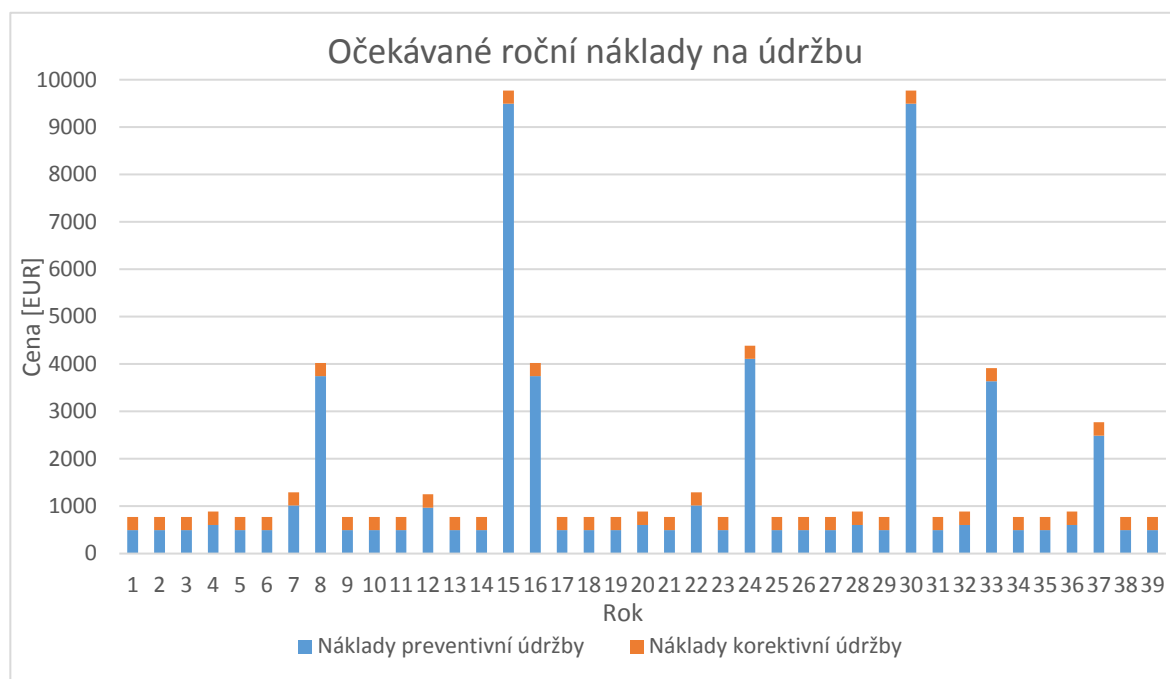
Z tabulky 5.6 vyplývá, že téměř polovinu nákladů korektivní údržby klimatizační jednotky tvoří komponenta měnič napětí. S 13 % podílem následuje elektronická řídicí jednotka, dále kompresor 11,1 % a ventilátor vzduchu 9,2 % z celkové ceny korektivní údržby.

Celkové náklady na údržbu klimatizační jednotky metra činí 66 001 EUR (viz. vzorec 3.3). Z koláčového grafu je patrné, že náklady preventivní údržby jsou více než pětinasobné (viz. obr. 5.3).



Obrázek 5.3 Celkové náklady údržby klimatizační jednotky *Autor*

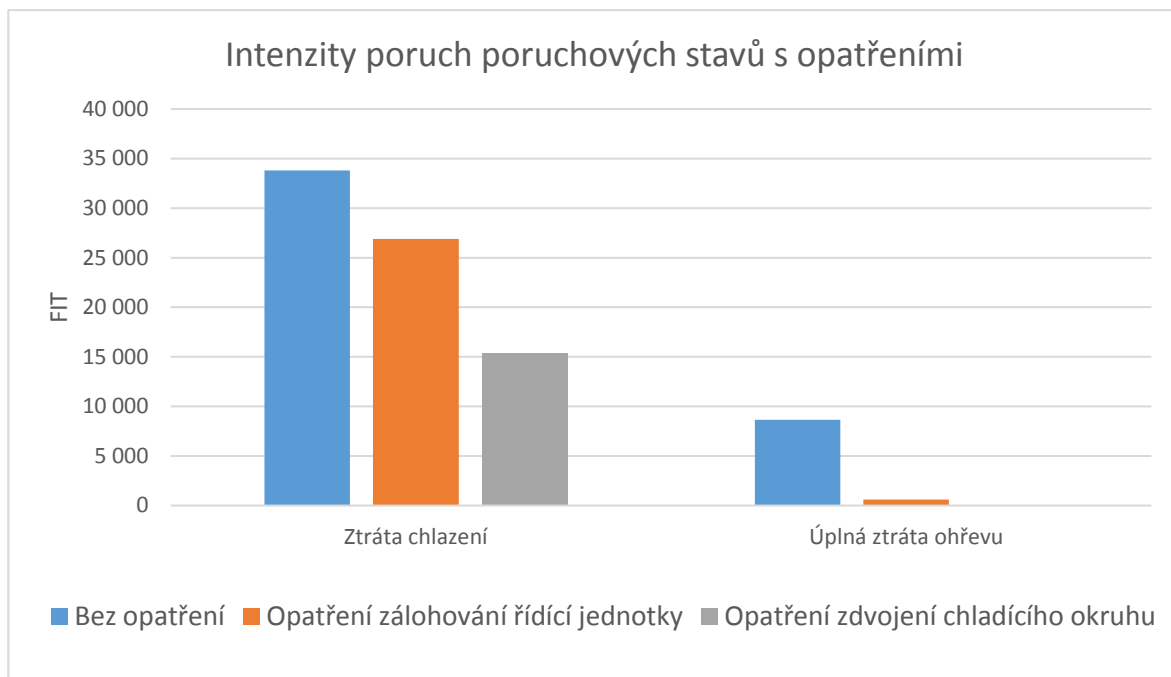
Níže byl sestrojen grafický přehled ročních nákladů údržby klimatizační jednotky. Náklady korektivní údržby jsou rovnoměrně rozčleněny do očekávané životnosti jednotky metra. Náklady na preventivní údržbu jsou vyobrazeny do roků podle intervalu údržby jednotlivých komponent. Z grafu lze např. vyčíst kdy proběhnou generální údržby a jakou cenu lze očekávat.



Obrázek 5.4 Předpokládané roční náklady údržby klimatizační jednotky *Autor*

## 6. Závěr

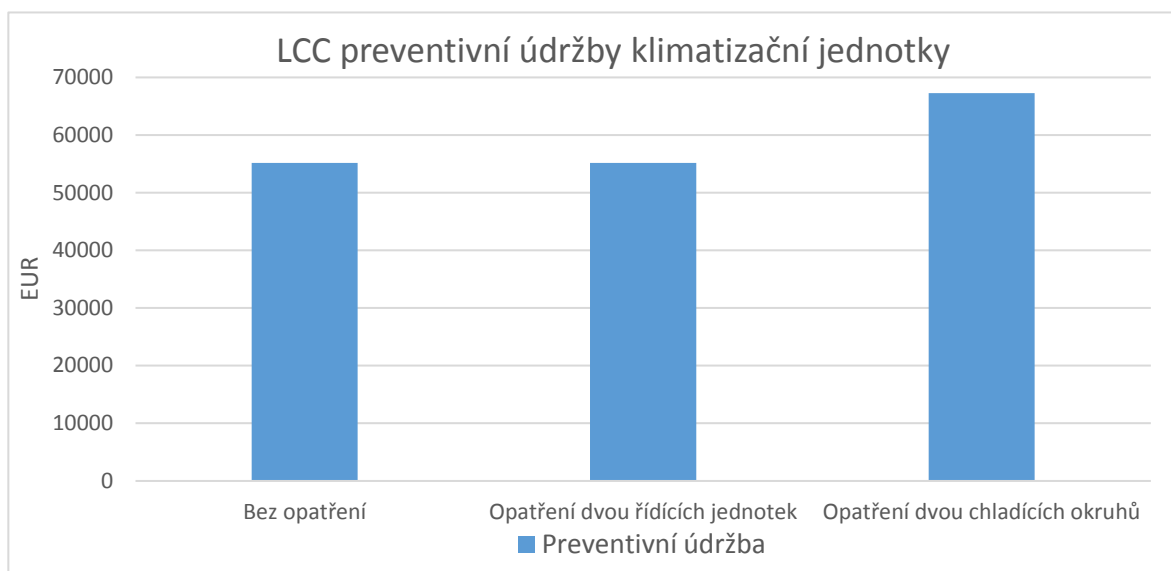
Nejspolehlivější řešení klimatizační jednotky je v případě zdvojení chladicího okruhu pro funkční režim chlazení. Toto řešení ale musíme zhodnotit ve vztahu LCC a dosažené bezporuchovosti. Pro porovnání bezporuchovosti jednotlivých funkčních režimů byl vytvořen graf.



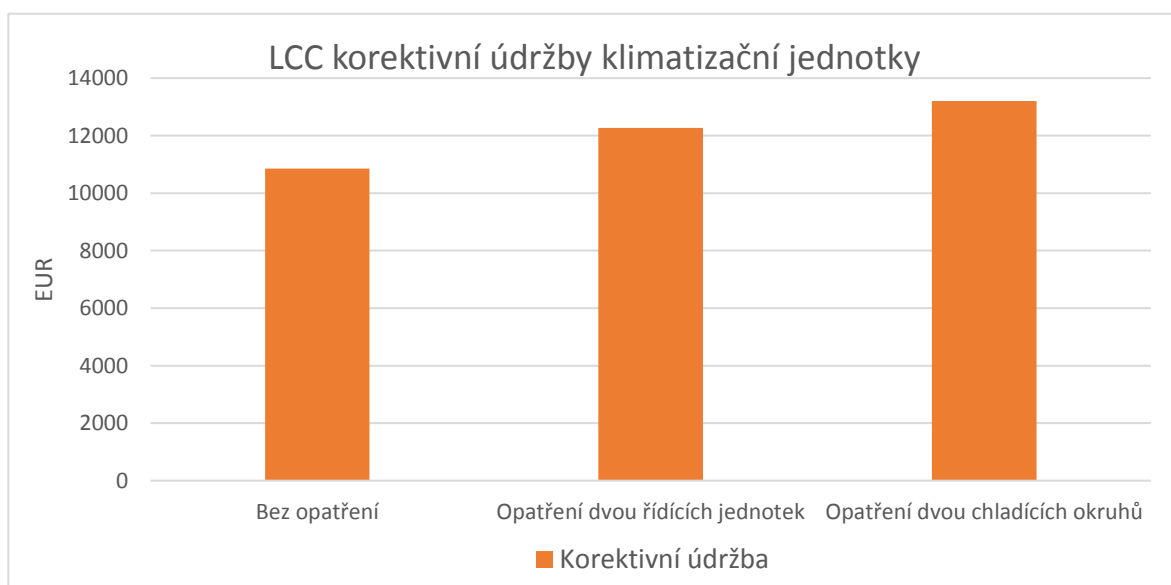
Obrázek 6.1 Intenzity poruch poruchových stavů s opatřeními Autor

Z obrázku 6.1 lze vyčíst, že zálohování elektronické řídicí jednotky nám zlepší bezporuchovost funkčního režimu chlazení i poruchového stavu úplné ztráty ohřevu. Zatímco zdvojení celého chladicího okruhu nám přinese větší spolehlivost u poruchového stavu ztráty chlazení, ale nijak se nepromítne do spolehlivosti ostatních funkčních režimů.

Při posuzování spolehlivosti je třeba brát zřetel na to, jak se dané opatření systémů promítne do původní ceny nákladů životního cyklu. Při zdvojení elektronické řídicí jednotky se zvýší pouze náklady korektivní údržby. S preventivní údržbou u elektronické jednotky nepočítáme (viz. tabulka 5.1). Promítnutí navržených opatření do nákladů životního cyklu lze vidět na obrázku 6.2 a 6.3.



Obrázek 6.3 LCC preventivní údržby klimatizační jednotky s opatřeními Autor



Obrázek 6.2 LCC korektivní údržby klimatizační jednotky s opatřeními Autor

Tabulka 6.1 Nárůst LCC s navrženými opatřeními Autor

Typ nákladů životního cyklu	Náklady na údržbu [EUR]	Navýšení původních nákladů o [EUR]	Navýšení původních nákladů o [%]
LCC preventivní údržby zálohované řídicí jednotky	55 149	0	0
LCC korektivní údržby zálohované řídicí jednotky	12 269	1417	13
LCC preventivní údržby zdvojeného chladícího okruhu	67 264	12 115	22
LCC korektivní údržby zdvojeného chladícího okruhu	13 210	2358	22

Z tabulky 6.1 je patrné, že návrh zdvojení chladicího okruhu se nepříznivě podílí na LCC, jelikož do preventivní i korektivní údržby musíme započítat dvakrát více komponent, které jsme v chladicím systému zálohovali. Náklady preventivní i korektivní údržby tohoto návrhu stouply o citelných 22 % a zlepšení spolehlivosti pozorujeme pouze u funkčního režimu chlazení. Řešení zálohované elektronické řídicí jednotky nám navyšuje pouze cenu LCC korektivní údržby o 13 %. Tento návrh se navíc projeví lepší bezporuchovostí funkčních režimů chlazení a vytápění. Proto se návrh zdvojení elektronických řídicích jednotek jeví jako výhodnější ve vztahu dosažené spolehlivosti a nákladů životního cyklu.

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Famfulíkovi, Ph.D. za jeho ochotu, odborné rady, nápady a připomínky, které byly přínosem k vypracování této bakalářské práce. Také chci poděkovat panu Ing. Radkovi Krzyžánkovi, Ph.D. za odborné konzultace, poskytnutí materiálů k práci a pomoc při řešení problémů.



## Seznam použité literatury

1. Plánování rozvoje dopravních soustav velkých městských aglomerací. *DOPRAVNÍ SOUSTAVA MĚSTSKÝCH AGLOMERACÍ: METRO* [online]. Zeleněč: Olbron Invent, 2015 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.olbron.cz/Metro.pdf>
2. FAMFULÍK, Jan, Vladimír HRANOŠ, Radek KRZYŽANEK a Zuzana GALVASOVÁ. Spolehlivost pozemní dopravy [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava Univerzita Pardubice, 2013 [cit. 2018-5-21]. ISBN 978- 80-248-3266-1. Dostupné z: [https://issuu.com/michdor/docs/m11\\_text](https://issuu.com/michdor/docs/m11_text)
3. *DIN EN 14750-1:2006-08. 10772 Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2006.*
4. Automatic train operation. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_train\\_operation](https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_train_operation)
5. IEC 60300-3-3. Edition 2.0. 2004-7
6. Podle ústního sdělení Ing. Radka Krzyžánka Ph.D. (zaměstnanec Siemens s.r.o. Mobility, 28. října 150/2663 Ostrava) dne 24. února 2018
7. Function of the main components. *Living enviromental systems* [online]. Italy: Mitsubishi electric Europe, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://les.mitsubishielectric.it/en/informazioni-utili/componenti-principali.php>
8. Guideline for the Design and Application of Heating, Ventilation and Air Conditioning Equipment for Rail Passenger Vehicles. *Ashrae*. 2014, **1**(1), 29-50.
9. Inspiro: The metro platform from Siemens. In: SIEMENS [online]. Germany: Siemens AG 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/metros/inspiration-citylife-inspiro/inspiro-plattform-en.pdf>

## Seznam použitých obrázků

Obrázek 1.1 Typologie metra podle způsobu tras <sup>1</sup> .....	11
Obrázek 1.2 Doporučené nastavení teploty interiéru <sup>3</sup> .....	14
Obrázek 1.3 Schéma zapojení chladicí jednotky <sup>9</sup> .....	17
Obrázek 2.1 Užší pojetí spolehlivosti <sup>2</sup> .....	19
Obrázek 2.2 Průběh hustoty pravděpodobnosti exp. rozdělení <sup>2</sup> .....	20
Obrázek 2.3 Průběh distribuční funkce odlišných intenzit poruch <sup>2</sup> .....	20
Obrázek 2.4 Pravděpodobnostní funkce pro odlišné hodnoty $\lambda$ <sup>2</sup> .....	22
Obrázek 2.5 Distribuční funkce pro různé hodnoty $\lambda$ <sup>2</sup> .....	22
Obrázek 2.6 Vanová křivka <sup>2</sup> .....	24
Obrázek 2.7 Značení událostí ve FTA <sup>2</sup> .....	25
Obrázek 2.8 Značení hradel ve stromě poruch <sup>2</sup> .....	26
Obrázek 4.1 Blokové schéma uspořádání vozů <sup>Autor</sup> .....	30
Obrázek 4.2 FTA pro poruchový stav ztráty chlazení <sup>Autor</sup> .....	33
Obrázek 4.3 podstrom FTA pro poruchový stav ztráty chlazení <sup>Autor</sup> .....	34
Obrázek 4.4 FTA částečné ztráty ohřevu <sup>Autor</sup> .....	36
Obrázek 4.5 FTA úplné ztráty ohřevu <sup>Autor</sup> .....	38
Obrázek 4.6 FTA částečné ztráty ventilace <sup>Autor</sup> .....	39
Obrázek 4.7 FTA úplné ztráty ventilace <sup>Autor</sup> .....	40
Obrázek 4.8 FTA ztráty chlazení (master + slave) <sup>Autor</sup> .....	42
Obrázek 4.9 FTA ztráty chlazení (dva chladicí okruhy) <sup>Autor</sup> .....	44
Obrázek 4.10 FTA úplné ztráty ohřevu (master + slave) <sup>Autor</sup> .....	46
Obrázek 5.1 Náklady preventivní údržby klimatizační jednotky <sup>Autor</sup> .....	57
Obrázek 5.2 Náklady korektivní údržby klimatizační jednotky <sup>Autor</sup> .....	58
Obrázek 5.3 Celkové náklady údržby klimatizační jednotky <sup>Autor</sup> .....	59
Obrázek 5.4 Předpokládané roční náklady údržby klimatizační jednotky <sup>Autor</sup> .....	60
Obrázek 6.1 Intenzity poruch poruchových stavů s opatřeními <sup>Autor</sup> .....	61
Obrázek 6.2 LCC korektivní údržby klimatizační jednotky s opatřeními <sup>Autor</sup> .....	62
Obrázek 6.3 LCC preventivní údržby klimatizační jednotky s opatřeními <sup>Autor</sup> .....	62

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1.1 Klasifikace vozidel podle EN 14750-2 <sup>3</sup> .....	13
Tabulka 1.1.2 Definice klimatických zón (zima) <sup>3</sup> .....	13
Tabulka 1.1.3 Definice klimatických zón (léto) <sup>3</sup> .....	14
Tabulka 1.1.4 Maximální průměrné teploty ve vozidle <sup>3</sup> .....	14
Tabulka 1.1.5 Evropské země a jejich klimatické zóny <sup>3</sup> .....	15
Tabulka 4.1 Parametry provozu <sup>6</sup> .....	30
Tabulka 4.2 Spolehlivostní analýza prvků chladicího okruhu <sup>6</sup> .....	31
Tabulka 4.3 Spolehlivostní analýza pro částečnou ztrátu ohřevu <sup>6</sup> .....	35
Tabulka 4.4 Spolehlivostní analýza pro úplnou ztrátu ohřevu <sup>9</sup> .....	37
Tabulka 4.5 Spolehlivostní analýza komponent ventilace <sup>6</sup> .....	39
Tabulka 4.6 Přehled poruchových stavů a jejich intenzity poruch <sup>Autor</sup> .....	41
Tabulka 5.1 Intervaly údržby a ceny komponent preventivní údržby <sup>6</sup> .....	48
Tabulka 5.2 Náklady na práci a materiál preventivní údržby <sup>Autor</sup> .....	52
Tabulka 5.3 Přehled komponent korektivní údržby <sup>Autor</sup> .....	53
Tabulka 5.4 Tabulka nákladů korektivní údržby .....	56
Tabulka 5.5 Tabulka kritických prvků preventivní údržby <sup>Autor</sup> .....	58
Tabulka 5.6 Tabulka kritických prvků korektivní údržby <sup>Autor</sup> .....	59
Tabulka 6.1 Nárůst LCC s navrženými opatřeními <sup>Autor</sup> .....	62